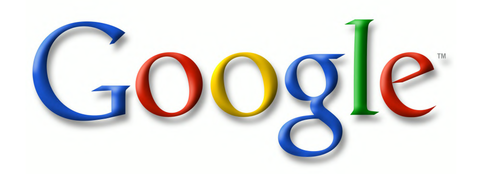

Google









Die Naturkräfte.

Die Naturkräfte.

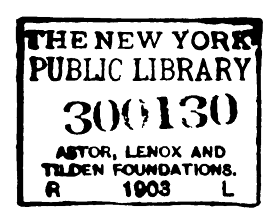
Ein Weltbild der physikalischen und chemischen Erscheinungen

von

Dr. M. Wilhelm Meyer.

Mit 474 Abbildungen im Text und 29 Tafeln in Farbendruck, Holzschnitt und Ätzung.

Leipzig und Wien.
Bibliographisches Institut.
1903.



Vorwort.

Das vorliegende Werk hat den Untertitel „ein Weltbild der physikalischen und chemischen Erscheinungen". Daraus ist ersichtlich, daß es kein Lehrbuch der Physik und Chemie sein will, sondern diese Erscheinungsgruppen unter dem Gesichtspunkt eines inneren Zusammenhanges aller Naturwirkungen, jener großen Einheit der Naturkräfte zu betrachten versucht, deren Auffindung das Endziel aller Forschung ist. Daher bringt das Werk nach der einen Richtung weniger, nach der anderen mehr als ein Lehrbuch im gewöhnlichen Sinne. Weniger, weil unter dem gewaltigen Stoff eine Auswahl getroffen werden mußte, damit unter Einzelheiten, die für den eingenommenen Gesichtspunkt ohne Belang sind, der Überblick nicht verloren ging; mehr, weil anstatt solcher übergangenen Einzelheiten, die das Werk als Lehrbuch lückenhaft erscheinen lassen würden, andere getreten sind, die über das Wesen der betreffenden Erscheinungsformen etwas aussagen, also Belege für jene gesuchte Einheit der Naturkräfte bilden.

So ist das Werk nicht eine zusammenhangslose Zusammenstellung der bezüglichen Wahrnehmungen und Tatsachen geworden, sondern auch in sich ein Ganzes, das, um recht verstanden zu werden, auch als Ganzes aufgenommen und innerlich verarbeitet werden muß. Wenn auch in den einzelnen Kapiteln das betreffende Material in übersichtlicher Weise zusammengestellt ist, so wird man doch aus der Kenntnisnahme der einzelnen Kapitel allein die Ausblicke über das Wesen der Erscheinungen und ihren Zusammenhang mit den anderen Disziplinen nicht richtig beurteilen können. Da aber auch bei dieser Anordnung unter der Fülle der notwendig zu behandelnden Einzelerscheinungen jenes durch das ganze Werk sich schlingende und alles vereinigende Band leicht aus den Augen verloren werden konnte, wurde in dem dritten Teil des Werkes „Die Stufenfolge der Naturvorgänge" noch einmal vom Gesichtspunkt dieser Einheit des Ganzen eine zusammenfassende Darstellung aller Erscheinungen der Natur gegeben, die als das eigentliche „Weltbild" zu gelten

hat, das sich aus der Fülle der in den vorangehenden Teilen gegebenen Einzelheiten als ein Gemälde in großen Zügen heraushebt. Mit den Einzelheiten der Materie vertrauten Lesern mag darum die Lektüre dieses letzten Teiles allein genügen, wenn sie sich die Mühe geben wollen, an zweifelhaften oder nicht ohne weiteres verständlichen Stellen die überall reichlich gegebenen Hinweise auf die betreffenden eingehenderen Darstellungen der vorangehenden Teile zu benutzen.

Bei der Behandlung der Aufgabe, überall den einheitlichen Zügen des Naturgeschehens nachzuspüren, hatte es für den Verfasser als Astronomen einen ganz besonderen Reiz, in den immer deutlicher der modernen Forschung sich darstellenden Aufbau der molekularen Materiesysteme Parallelstellen mit den großen Systemen der Himmelskörper, ihren Bewegungen und Beziehungen zueinander aufzusuchen. Dadurch gewann das Bild an Größe und Vertiefung.

Die gestellte Aufgabe brachte es mit sich, daß dem Hypothetischen ziemlich viel Raum gewährt wurde. Das Wesen der Naturkräfte ist noch immer geheimnisvoll geblieben, und alle Betrachtungen darüber sind hypothetisch, mögen sie auch in vornehm wissenschaftlichem Gewand auftreten und uns mit einer Fülle von krausen Integralen zu imponieren suchen. Die ganze moderne Wissenschaft arbeitet mit dem Begriff des Atoms, aber seine wirkliche Existenz bleibt trotzdem unbewiesen. Gerade in der neusten Zeit beginnt wieder von seiten strengster Fachgelehrten ein Angriff gegen die Atome, indem man wenigstens den Weltäther, der die Erscheinungen der strahlenden Wärme, des Lichtes und der Elektrizität hervorbringt und vermittelt, wieder als kontinuierlich, d. h. als eine einzige wirklich zusammenhängende, elastische Masse ansieht, die nicht mehr in einzelne Atome zerfällt. Durch viele der wunderbaren Entdeckungen der neueren Zeit, z. B. über die neuen Strahlengattungen, werden den Grundfesten unserer Anschauungen über den innersten Aufbau der Materie erschüttert, aber auch auf der anderen Seite viele neue Gesichtspunkte eröffnet, welche die bereits bekannten einheitlichen Züge des Weltbaues überraschend vermehren oder beleuchten. Gerade in dieser Zeit, wo die alten Anschauungen über das Wesen der Naturkräfte wieder flüssig zu werden beginnen und wir vielfach nach neuen Kristallisationspunkten suchen, war es eine fruchtbringende Aufgabe, ein einheitliches Bild von dem Zustandekommen der Naturerscheinungen auf möglichst wenigen Voraussetzungen zu entwickeln, selbst auf die Gefahr hin, die Zahl der nötigen Hypothesen beim spezielleren Aufbau noch um einige zu vermehren. Alle hypothetischen Betrachtungen aber sind als solche immer sehr deutlich hervorgehoben, und der Verfasser verwahrt sich hier ausdrücklich dagegen, daß er die in diesem Werk an einigen Orten eingefügten eigenen Ansichten durch die vorliegende Darstellung genügend begründet erachtete, was ja in einem populären Werke gar nicht möglich ist. Sie mußten gegeben werden, um in der einheitlichen Darstellung keine Lücke zu lassen.

In dieser Hinsicht ist auch noch zur Beurteilung des Werkes zu bemerken, daß für die gemeinverständliche Darstellung manche Erklärungen von Erscheinungsgruppen wesentlich einfacher gestaltet werden mußten, als sie in Wirklichkeit sind. Wäre nicht immer wieder auf das Hypothetische der betreffenden Dinge hingewiesen, so möchte es manchmal dem Unkundigen erscheinen, als ob Fragen, die noch ihrer Lösung harren, hier auf das einfachste erledigt würden. So ist es z. B. mit dem Wesen der Schwerkraft, das durch die in diesem Werk angenommene geradlinig fortschreitende Bewegung der Ätheratome völlig erklärt zu sein scheint, während bei tieferem Eindringen in die Materie sich doch noch manche große Schwierigkeiten diesem Erklärungsversuch entgegenstellen. Im Rahmen des vorliegenden Werkes wäre es ganz unmöglich gewesen, auf die Meinungsverschiedenheiten der Gelehrten über das Wesen der Erscheinungen im besondern einzugehen.

Es ist ferner zur Beurteilung dieses Werkes nötig, darauf hinzuweisen, daß in ihm soviel als möglich die Anschauungen und Begriffe derart entwickelt wurden, daß zunächst eine Reihe von Erscheinungen als solche beschrieben und dann bereits ein erster, aber recht einfacher Versuch zu ihrer Erklärung gemacht wurde, der unter Umständen bei noch weiterer Sammlung von Tatsachen zu verbessern ist. So muß zum Beispiel der Leser, der erst bis etwa zur Mitte des Lichtkapitels vorgedrungen ist, annehmen, daß der Verfasser noch auf dem alten Standpunkt der Emissionstheorie steht, bis ihn die Interferenzerscheinungen zur Annahme der Wellennatur des Lichtäthers zwingen. Der Verfasser hält einen solchen Aufbau für pädagogisch fruchtbringender als die sofortige Stellungnahme zu einer bestimmten Ansicht. Von diesem Gesichtspunkt aus wird man hoffentlich auch die Aufzählung der anorganischen Verbindungen nach einem veralteten System richtig beurteilen, namentlich da wir uns bei den organischen Verbindungen bereits auf einen neueren Standpunkt durchgearbeitet haben. Wie in der Natur selbst sollten sich auch in diesem Werke die Dinge erst nach und nach entwickeln.

Die ganze Art dieses Werkes bedingt es, daß man darin nicht den Staub vieler Bibliotheken finden wird. Es kam nicht darauf an, möglichst alles Wissen in gedrängter Form über die Materie zusammenzutragen. Wir wollten ebensowenig wie ein Lehrbuch ein Nachschlagebuch schaffen. Selbstverständlich mußte aber das tatsächlich Gegebene so exakt wie möglich sein. Um dies zu erreichen, konnte der Verfasser nichts Besseres tun, als sich einer bewährten Führung anzuvertrauen. Für das physikalische Wissen ist deshalb für ihn leitend gewesen die „Experimentalphysik“ von Riecke, für die chemischen Untersuchungen der neueren Zeit die „Theoretische Chemie“ von Nernst. Die meisten Tatsachen (und nur diese) moderner Forschung auf diesen Gebieten, welche man in diesem Werk findet, namentlich auch viele Zahlenangaben, sind jenen beiden Werken entnommen, die sich

in Fachkreisen unbedingter Anerkennung erfreuen. Es ist aber wohl nicht nötig, hinzuzufügen, daß auch noch eine große Reihe anderer Quellen benutzt worden ist.

Trotzdem hat der Verfasser, um sich größere Sicherheit zu verschaffen, daß in der Wiedergabe der Beobachtungstatsachen sich keine erheblichen Fehler eingeschlichen haben (es ist ja bei der Fülle des heute vorhandenen Wissensmaterials selbst für den Fachmann nur noch möglich, ein eng umgrenztes Gebiet wirklich ganz zu beherrschen), einige in den betreffenden Gebieten besonders hervorragende Gelehrte gebeten, einzelne Kapitel dieses Werkes im Manuskript durchzusehen. Er ist deswegen den nachfolgend genannten Herren zu großem Danke verpflichtet. Herr Professor *Eduard Riecke* hatte die Güte, die Kapitel über die *Wärme* und die *Elektrizität* durchzusehen und wertvolle Winke zu Verbesserungen zu geben. Das Kapitel über die neuen Strahlen hat Herr Professor *E. Goldstein* geprüft und in liebenswürdiger Weise sein Laboratorium zur Verfügung gestellt, um die so vorzüglich gelungene Farbentafel der Erscheinungen in Kathodenröhren ꝛc. nach Goldsteinschen Originalröhren anzufertigen. Die Kapitel über *theoretische Chemie* sind von den Herren Professoren *J. Traube* und *H. Landolt* gelesen worden. Außerdem hat Herr Dr. *L. von Orth* das elektrische Kapitel noch einmal vom Standpunkt des *Elektrotechnikers* angesehen, und der großen Mühe, das ganze Manuskript auf unterlaufene Fehler durchzugehen, hat sich Herr Dr. *R. Blochmann* unterzogen. Ganz besonders aber ist der Verfasser der *Verlagsbuchhandlung* zu Dank verpflichtet, die das Werk nicht nur mit einem ganz ungewöhnlich großen Kostenaufwand in der denkbar gediegensten und reichsten Weise ausstattete, sondern es auch durch die vielfachen Erfahrungen der Leiter des Bibliographischen Institutes in redaktioneller und inhaltlicher Hinsicht wesentlich förderte.

Charlottenburg, im April 1903.

Dr. M. Wilhelm Meyer.

Inhalts-Verzeichnis.

Erster Teil.

Die physikalischen Erscheinungen und ihre Gesetze.

Zweiter Teil.

Die chemischen Erscheinungen.

Dritter Teil.

Die Stufenfolge der Naturvorgänge.

Verzeichnis der Abbildungen.

Farbige Tafeln.

Schwarze Tafeln.

Abbildungen im Text.

Die Naturkräfte.

Einleitung.

1. Überblick und Abgrenzung der zu beschreibenden Erscheinungen.

Alle Bewegungen, alle Zustandsänderungen, die wir ringsumher an den Körpern der toten wie der lebendigen Natur vor sich gehen sehen, können, soweit wir es uns vorzustellen vermögen, nur von Kräften hervorgebracht werden, die ihnen innewohnen oder von außen her auf sie wirken. Da kein Zustand auch nur einen Augenblick wirklich unverändert beharrt, wie alle Erfahrung lehrt, so ist der augenblickliche Zustand der gesamten Welt, ihre Vergangenheit und Zukunft, kurz der ganze Umfang unseres Wissens, im strengen Sinn ein Produkt der Naturkräfte und müßte in diesem Werke behandelt werden.

Die Beschränktheit unseres geistigen Vermögens allein macht es uns zur Unmöglichkeit, alle diese eng ineinandergreifenden Bewegungen als ein Ganzes zu betrachten und zu beschreiben. Wir müssen sie in einzelne Kategorien zerlegen und gesondert untersuchen, ehe wir das einheitliche Bild der Natur, wie wir es vor uns sehen, wieder aus den Einzelerkenntnissen zusammensetzen und dadurch verstehen lernen. Wir müssen es also immer klar vor Augen behalten, daß wir jene Zergliederung der Naturkräfte aus äußerlichen, praktischen Gründen selbst geschaffen haben, ehe unsere Erkenntnis weit genug reichte, um zu wissen, inwieweit diese verschiedenen Erscheinungen wirklich aus wesentlich verschiedenen Naturwirkungen hervorgehen. Es ist nicht von vornherein erwiesen, daß die Schwerkraft, das Licht, die Wärme, die Elektrizität, der Nervenreiz, die Gedankenarbeit in ihrem Wesen verschieden sind. Wir haben diese Wirkungen zunächst getrennt behandelt, dürfen aber niemals vergessen, zu einer Zeit, da wir die einzelnen Kategorien bis zu einem gewissen Grade geistig durchdrungen haben, sie alle wieder in Verbindung miteinander zu bringen.

Auch in diesem Werke müssen wir notgedrungen zunächst den lebendig pulsierenden Leib der Natur zerschneiden und die amputierten Stücke einzeln betrachten. Wenn uns im Wesen und Wirken jener einzelnen Glieder noch vieles unklar bleibt, so darf uns das deshalb nicht wundern. Ebenso verstehen wir nicht oder ahnen es höchstens nur, wozu unsere Ohrmuschel dient, wenn wir nicht die tiefer liegenden Organe des Gehörs zugleich mit betrachten können. Wir hoffen darauf, daß eine Betrachtung der Naturerscheinungen in ihrem Zusammenhange, die beim heutigen Stand unserer Kenntnisse nur sehr unvollkommen möglich ist, eine immer größere allgemeine Klärung und harmonische Auflösung ergeben wird.

Wenn wir uns nun anschicken, das Naturgebiet abzugrenzen, das wir in diesem Werke besonders behandeln wollen, werden wir gut tun, diese Grenzen nicht allzu scharf zu ziehen,

da wir von vornherein nicht wissen können, ob wir bei einer so strengen Trennung, wie sie die Wissenschaft sonst so sehr zu lieben pflegt, nicht mitten in einen organischen Zusammenhang hineinschneiden, und uns dadurch jedes Verständnis für das Bruchstück, das uns als Ganzes aufgedrungen wurde, verloren gehen müßte.

Eine Trennungslinie, die das gesamte Naturgeschehen in zwei große, äußerlich zum mindesten grundverschiedene Gebiete zerlegt, ist durch die sogenannte Lebenstätigkeit geschaffen. Wir erblicken Körper in der Natur, die an sich regungslos sind, d. h. sich weder bewegen noch verändern können, wenn sie von äußeren Einwirkungen, soviel es uns möglich ist, getrennt werden. Wir nennen sie tote Körper. Ihnen gegenüber gibt es solche, die, wenigstens dem Anscheine nach, sich aus sich selbst heraus bewegen oder verändern können, die Lebewesen. Was wir im landläufigen Sinn unter den Wirkungen der Naturkräfte verstehen, sind die Beziehungen der toten Körper zueinander, und diese sollen im gegenwärtigen Werke beschrieben werden.

Man muß aber ohne weiteres zugeben, daß eine strenge Scheidung zwischen Lebendigem und Totem nach der obigen Definition keineswegs zu treffen ist. So scheinen die Bewegungen der Himmelskörper zunächst ohne irgend welche Einwirkung von außen her zu geschehen; man könnte sie als Äußerungen einer Weltseele auffassen, wie es vor der Reformation der Sternkunde manche scharfsinnigen Philosophen getan haben. Daß diese Bewegungen nach unabänderlichen Gesetzen in immer gleichbleibender Weise vor sich gehen, ist kein Beweis gegen die Möglichkeit einer Lebenstätigkeit, denn wir sehen innerhalb der letzteren auch mehr oder weniger gleichbleibende rhythmische Bewegungen, wie z. B. die Pulsationen des Herzens. Außerdem könnte man annehmen, daß Wirkungen, die sich abweichend von den Gesetzmäßigkeiten der toten Natur erweisen würden, dort ungemein langsam geschehen, so daß sie uns entgehen; wie etwa ein infusorisch kleiner Schmarotzer, der vielleicht nur den millionsten Teil des Lebens seines Wirtes besitzt, dessen willkürliche Bewegungen nicht wahrnehmen könnte. Und nun gar erst jene Fernwirkungen ohne jede zwischenliegende Materie, durch welche heute noch viele Naturphilosophen diese Bewegungen der Himmelskörper zur Genüge erklärt zu haben glauben, wären durchaus zu vergleichen mit den Fernwirkungen unseres Geistes, der höchsten Betätigung des Lebendigen.

Anderseits gibt es Lebewesen, namentlich deren Keime, denen man entweder erst nach sehr sorgfältiger Beobachtung oder überhaupt nicht die besonderen Eigenschaften der lebendigen Materie zuerkennen kann. Ein Weizenkorn, das man von allen äußeren Einflüssen abschließt, wird nicht die geringste Lebensregung zeigen. Man hat ein solches jahrelang unter Quecksilber von jeder Möglichkeit eines noch so langsamen Stoffwechsels, der als das Hauptmerkmal der Lebenstätigkeit gilt, ausgeschlossen, und doch war es lebendig geblieben, denn es keimte auf, sobald die äußeren Bedingungen dazu vorhanden waren.

Wir führen diese leicht zu vermehrenden Beispiele nur an, um zu zeigen, daß es von vornherein schwieriger ist, eine feste Grenze zwischen dem Lebendigen und dem Toten zu ziehen, als man es vielleicht erwartet. Selbst innerhalb des einfachsten sowohl als des kompliziertesten lebenden Organismus begegnen wir Vorgängen, die ausschließlich durch die Wirkungen derselben Naturkräfte zu erklären sind, welche die tote Natur beherrschen, so daß es eine ansehnliche Richtung von Forschern gibt, die davon überzeugt sind, daß einmal alle Lebensregungen bis hinauf zur Entstehung unserer Gedanken durch dieselben Kräfte völlig erklärbar sein werden, welche die tote Materie bewegen.

Um also unser Gebiet zu begrenzen, bleibt uns nichts anderes übrig, als willkürlich festzusetzen, daß wir die Vorgänge in den sogenannten Organismen zunächst beiseite lassen,

besonders schon deswegen, weil sie sich als die bei weitem verwickelteren herausstellen, und es doch zweifellos der richtigere Weg ist, vom Einfacheren zum Komplizierteren überzugehen.

Die Vorgänge in der Welt der toten Materie lassen sich ohne weiteres wieder in zwei Gruppen trennen: die außerhalb der Erde geschehenden und die unter unseren Händen stattfindenden. Der Unterscheidungsgrund ist hier ein rein äußerlicher, aber durch den Umfang unseres Wissens geboten. Die Wissenschaft von den Ursachen der Vorgänge in der toten Natur hat man von alters her mit Physik bezeichnet, und mit vollem Rechte war die Wissenschaft von den Bewegungen und Zuständen der Himmelskörper nur als ein Teil der Physik betrachtet worden. Nur aus ökonomischen Gründen hat sich die Astronomie von ihr abzweigen müssen, und allein aus diesem Anlaß beschränken auch wir uns hier auf die Betrachtung der Vorgänge an der irdischen toten Materie, indem wir nur an den Stellen Ausblicke in das Weltgebäude tun, wo man dort wertvolle Bestätigungen hier gefundener Gesetze entdeckt. Die Wissenschaft der Physik in dem Umfange, den wir ihr heute zusprechen, ist so glücklich, die Daten der astronomischen Wissenschaft gänzlich entbehren zu können, was man umgekehrt von der letzteren nicht zu sagen vermag. Will man die Vorgänge am Himmel verstehen lernen, so muß man sie auf irdisch kontrollierbare Vorgänge zurückführen, also auf die von der Physik gefundenen Gesetze. Letztere ist also die grundlegende Wissenschaft.

Wenn wir sagten, daß die Physik, deren Untersuchungsgebiet sich auf die Erde beschränken soll, die Erfahrungen der astronomischen Wissenschaft entbehren könne, so wollen wir doch nicht vergessen, daß der Physiker kein einziges Experiment anzustellen vermag, für welches er den Einfluß der Himmelskörper, insbesondere den der mächtigen Sonne, ausschließen kann. Aber diese Wirkungen erweisen sich als so stetig, daß sie in völlig gleichmäßiger Weise die vom Physiker beobachteten Vorgänge beeinflussen, also aus dem Resultat etwa ebenso herausfallen wie die Hinzufügung der gleichen Summe auf beiden Seiten einer algebraischen Gleichung. Es ist indes gut, in diesen grundlegenden Betrachtungen sich klar darüber zu werden, daß ein so vollkommener Ausgleich durchaus nicht immer stattzufinden braucht, ja ganz sicher, streng genommen, niemals stattfindet, wie es denn überhaupt nichts völlig Stetiges geben kann. Je feiner unsere schon jetzt erstaunlich vorgeschrittenen Messungsmethoden werden, je öfter wird auch der Physiker in die Lage kommen, jene vorhandenen außerirdischen Einflüsse oder vielmehr ihre Veränderungen während seines Experiments in Betracht zu ziehen. Also auch hier ist eine strenge Trennung der Gebiete wiederum nicht möglich.

Von der eigentlichen Physik hat sich nun auf der der Astronomie gewissermaßen gegenüberliegenden Seite ein Gebiet abgezweigt, daß man die Chemie genannt hat. Die Grenzlinie zwischen diesen beiden Disziplinen von vornherein zu ziehen, ist indes schwieriger als in den vorangegangenen Fällen. Die chemischen Vorgänge unterscheiden sich von den physikalischen hauptsächlich dadurch, daß die ersteren nur bei engster Berührung der in Betracht kommenden Körper beobachtet werden und dauernde materielle Veränderungen derselben hervorbringen. Beide Gruppen von Naturerscheinungen sind im wesentlichen unzertrennlich. Viele physikalische Vorgänge sind im stande, chemische Vorgänge zu erzeugen oder einzuleiten. So ist das Licht die Ursache des chemischen Prozesses, der auf der photographischen Platte vor sich geht. Die chemischen Erscheinungen nun gar sind vollständig abhängig von den physikalischen Bedingungen, unter denen sie stattfinden. Jede chemische Reaktion hat bestimmte Temperaturgrenzen, innerhalb deren sie eintritt. Wegen dieser Unzertrennlichkeit sollen in diesem Werke Physik und Chemie nacheinander und ineinandergreifend behandelt werden.

Aber der reinen Physik muß offenbar der Vortritt gelassen werden, jener Wissenschaft, die sich mit den Wirkungen der Körper aus direkt meßbarer Entfernung befaßt, weil dem Augenscheine nach, der uns zunächst allein leiten kann, diese Vorgänge am einfachsten und am leichtesten kontrollierbar sind.

Rings um uns her sind wir von jenen Erscheinungen umgeben, die in das Gebiet der reinen Physik gehören. Mit dem ersten Schritte, den wir in die Welt tun, müssen wir uns mit den Wirkungen der Schwerkraft abfinden lernen, die uns schon diesen ersten Schritt erschwert. Weniger als alle übrigen haben wir diese Naturkraft zu meistern und in unseren Dienst zu zwingen verstanden. Bei all unseren Tätigkeiten legt sie uns, angesichts ihrer Allgegenwart, Fesseln auf, von denen wir uns niemals loszumachen lernen werden. Erhöht sich der Druck, mit welchem die Körper vermöge ihrer Schwere auf ihrer Unterlage lasten, in genügendem Maße, so erwärmen sich die Körper. Auf dieser Verwandlung beruht zum großen Teil die Wärme des Erdinneren. Diese Erscheinung der Wärme können wir auch durch chemische Prozesse, durch Verbrennung, hervorrufen, und wir brauchen nicht erst darauf hinzuweisen, wie vielfach sie im Haushalte der Natur und der Kultur verwendet wird. Steigern wir die Wärme eines Körpers, so kann er glühend, selbstleuchtend werden. Das Licht durchschwirrt in allen Richtungen die Räume um uns her; wie unvollkommen müßte unsere Erkenntnis der Natur bleiben, wenn diese wundervollste von allen Naturerscheinungen nicht die Vermittlerin zwischen den Körpern außer uns und unserem Auge wäre! Wie vielfältig hat uns die Welt des Lichtes entzückt! Seine natürliche Quelle ist für uns die Sonne. Sie verklärt alle irdischen Landschaften vom Pol bis zum Äquator in der herrlichen Symphonie ihrer Farbenstufenfolge. Und die flimmernden Strahlen, die das nächtliche Dunkel des Firmaments durchbrechen, haben die erhabensten Gedankenreihen ausgelöst, welche die Intelligenz des Menschen auszudenken vermag.



Galvanis erster Versuch der Muskelkontraktion von Froschschenkeln durch den elektrischen Strom. Nach Reproduktion des Originals von Oettingen. Vgl. Text, S. 7.

Ist so das Licht der Vermittler zwischen uns und den letzten Tiefen des unserer Kenntnis zugänglichen Weltgebäudes, so übermittelt uns dagegen der Schall die Kenntnis von Vorgängen nur aus verhältnismäßig großer Nähe. Er ist es, dem das wichtige Amt der Übertragung der Gedanken von Geist zu Geist durch unsere Sprache zuerst oblag, und der fast nicht minder als das Licht durch seine Farbenstufen uns durch die der Töne zu entzücken vermag.

Wir haben damit die auffälligsten physikalischen Erscheinungen in vorläufig ganz zufälliger Reihenfolge an uns schnell vorübergehen lassen; es tritt nun noch ein anderes weites Gebiet zu ihnen, dessen Vorgänge nur unter ungewöhnlichen äußeren Umständen zur Erscheinung kommen, das der Elektrizität und des mit ihr nahe verwandten Magnetismus. Kannte man auch

seit jeher einige wenige in dieses Gebiet gehörige Erscheinungen, so ist doch bekanntlich die Elektrizität als eine besondere Naturkraft erst vor einigen Jahrhunderten erkannt worden, seit Galvani seine berühmten Froschexperimente (s. die Abbildung auf S. 6 und die untenstehende) machte. Wie ungemein wichtige Dienste sie uns heute leistet, wie sie, die sich so lange verborgen hielt, zur fast überall gegenwärtigen, geschicktesten, geschmeidigsten Gehilfin des Menschen bei seinen verwickeltsten Aufgaben geworden ist, weiß jedermann. Die Elektrizität kann für uns nur durch Vermittlung einer anderen Naturkraft in die Erscheinung treten, nicht unmittelbar wie das Licht, die Wärme, der Schall. Sie kann im elektrischen Funken als Lichterscheinung auftreten, oder eine Schallempfindung durch das Knistern des Funkens auslösen, oder eine Wärmeempfindung verursachen, oder weiter einen Nervenreiz als elektrischen Schlag erzeugen; endlich kann sie dauernde Veränderungen chemischer Natur an Körpern verursachen. In der Form des Magnetismus vermag die Elektrizität eine stärkere Anziehungskraft auszuüben als die Schwerkraft und sich deshalb durch solche Gegenwirkung bemerkbar zu machen.



Galvanis zweiter Versuch der Muskelkontraktion von Froschschenkeln durch den elektrischen Strom. Nach Reproduktion des Originals von Oettingen.

Mehr als in allen anderen Gebieten der reinen Physik tritt uns bei der Elektrizität die Wahrnehmung entgegen, daß viele der scheinbar verschiedenartigsten Wirkungen der Körper ineinander übergehen, da aus Elektrizität Licht, Wärme, Schall, Anziehungskraft, chemische Kraft werden kann. Wir dürfen also von vornherein vermuten, daß eine allgemeinere Ursache allen diesen Einzelwirkungen zu Grunde liegt.

Nirgends aber ist der Übergang einer Erscheinung in die andere so auffällig wie zwischen der Elektrizität und den chemischen Wirkungen. Durch Zusammenfügen gewisser chemischer Substanzen wird in den sogenannten galvanischen Elementen ein so lange andauernder „elektrischer Strom“ erzeugt, als eine bestimmte chemische Umwandlung jener Stoffe stattfindet. Die Umwandlung z. B. des Zinks in ein Zinksalz, die in unsichtbarer Weise zwischen den kleinsten Teilen des Zinks und der mit diesem in Berührung gebrachten Schwefelsäure vor sich gehen muß, kann in beliebig weiter Entfernung von diesem Vorgange Licht, Wärme, Anziehungskraft erzeugen. Die notwendig vorhandenen Bewegungen sehr kleiner Teile bei den chemischen Vorgängen bringen also unter Umständen sehr auffällige Bewegungen großer Körper hervor. Wir können auch den Prozeß völlig umkehren, indem wir einen großen Körper, z. B. eine Dynamomaschine, in Bewegung setzen, dadurch einen elektrischen Strom erzeugen und durch diesen wiederum die Teile des Zinksalzes, welche sich vorhin freiwillig vereinigt hatten, in unsichtbar kleiner

Bewegung auseinander zu gehen zwingen, indem sich das metallische Zink wieder ausscheidet. Alle diese Umstände machen es zur Genüge begreiflich, daß das **Grenzgebiet** zwischen Physik und Chemie ein ungemein großes und nicht in allen Fällen festzulegendes ist. Unser Unterscheidungsmerkmal, daß die chemischen Veränderungen dauernde sind, läßt sich nicht ganz scharf anwenden. Denn viele chemische Verbindungen sind durch chemische oder physikalische Einwirkungen wieder lösbar. Es entscheidet schließlich nur der Grad der Leichtigkeit, mit dem dies geschieht. Wenn man Zucker in Wasser auflöst, so geht dabei mit beiden Teilen sichtlich eine zunächst dauernde Veränderung vor. Um aus dem entstandenen Zuckerwasser wieder Zucker und Wasser zu machen, destillieren wir das letztere mit Hilfe von Wärmewirkungen ab. Im Wesen aber unterscheiden sich offenbar die beiden nötigen Arbeitsleistungen, durch welche die Körper in ihren ursprünglichen Zustand zurückgeführt werden, nicht voneinander. Der Fachmann zwar kennt noch feinere Unterscheidungen; er sagt, daß im einen Falle nur ein physisches Gemenge der Substanzen, im anderen eine chemische Verbindung entstehe. Wir werden später sehen, daß es sich auch hierbei nur um eine feinere oder gröbere Anordnung der entstehenden Vereinigungen der Substanzen handelt, wodurch die größere oder geringere Schwierigkeit, die Maschen des Materiegewebes wieder zu lösen, hervorgebracht wird.

Es gibt zwar eine große Anzahl von chemischen Prozessen, bei denen eine Rückführung der beteiligten Materien in ihren ursprünglichen Zustand nicht gelingt. Es ist sehr leicht, ein Ei zu kochen, aber es ist uns ganz unmöglich, das dadurch geronnene Eiweiß wieder in seinen natürlichen frischen Zustand zurückzuversetzen. Bei allen sogenannten **organischen Verbindungen** war dies bis vor nicht langer Zeit die Regel, daß man sie nämlich wohl auseinanderzureißen, aber nicht wieder zusammenzusetzen vermag. Wir hätten hieraus also eine der hauptsächlichsten Unterscheidungen für die beiden Hauptzweige der chemischen Wissenschaft, der **anorganischen** und der **organischen Chemie**, einstmals konstruieren können, während heute allerdings diese Unterscheidung viel schwieriger geworden ist.

Die **anorganische Chemie** befaßt sich mit den Verbindungen der Körper, so wie sie die tote Natur uns direkt liefert. Innerhalb dieses Gebietes hat man immer entstandene Verbindungen zu lösen oder wiederherzustellen, oder, um Fachausdrücke anzuwenden, zu jeder **Analyse** die betreffende **Synthese** zu machen vermocht.

Die Substanzen, mit denen sich die **organische Chemie** beschäftigt, bestehen zwar auch aus toter Materie, aber sie entstehen in den Organismen oder doch nur durch ihre Vermittelung. Wir können meist sehr leicht diese organischen Substanzen in die Bestandteile zerlegen, welche die Organismen aus der toten Natur entlehnt hatten, um jene sogenannten organischen Verbindungen herzustellen. Wir haben also die Elemente derselben quantitativ wie qualitativ in unseren Händen und sind doch nur in verhältnismäßig wenigen, in letzter Zeit aber sich mehrenden Fällen im stande, sie wieder zu erzeugen. Man unterscheidet insbesondere die organischen Verbindungen von den **organisierten**. Diese entstehen in den Organen, wie Stärke, Eiweiß, Blut, jene sind Ausscheidungen der Organe, wie der Blumenduft, das Petroleum, der Harnstoff. Während man von diesen gegenwärtig eine große Anzahl aus den Elementen wieder aufzubauen versteht, ist dies bei keinem der organisierten Verbindungen gelungen. Hier öffnet sich die tiefe und geheimnisvolle Kluft zwischen dem Lebendigen und dem Toten. Wir wissen wohl, wie das tote Eiweiß zusammengesetzt ist, ja es ist sogar in jüngster Zeit gelungen, eine ähnliche Substanz aus den Elementen wieder zu erzeugen. Sobald es aber als **Protoplasma** sich lebend zeigt, d. h. ohne irgend welche Organe zu besitzen, sich doch gegen das Gesetz

der Schwere fortbewegt und durch Aufnahme und Überführung toter Materie das eigene Gefüge zu vergrößern und durch einfache Teilung zu vermehren vermag, ist es ganz anderen chemischen Reaktionen unterworfen. Diese hören von dem Augenblick an auf, in welchem das unförmliche Protoplasmaklümpchen abstirbt. Das kann durch die geringsten äußeren Einflüsse geschehen und ist doch unter keinen Umständen wieder ungeschehen zu machen. Es ist ja leider das allbekannteste aller Gesetze der Natur, daß man wohl das Lebendige töten, niemals aber das Tote wieder zum Leben erwecken kann.

Die organischen Verbindungen sind mit nur sehr wenigen Ausnahmen wesentlich verwickelter als die in der unorganischen Natur vorkommenden oder zu erzeugenden. Man könnte deshalb der Meinung sein, daß die Synthese der organisierten Verbindungen nur bis jetzt noch nicht gelungen ist. Denn die systematisch fortschreitende Wissenschaft der Chemie ist in der Tat noch sehr jung, und man kann deshalb die Möglichkeit, daß hier nur technische, nicht im innersten Wesen der Natur begründete Schwierigkeiten vorliegen, nicht von vornherein von der Hand weisen und also nicht sagen, daß es in aller Ewigkeit nicht möglich wäre, nach dem Rezept von Fausts Famulus einen Menschen in der Retorte zu machen.

Aber will man auch der Lebenstätigkeit keine anderen Eigenschaften beimessen, als welche den in der toten Natur herrschenden Kräften innewohnen, so wird doch das Experiment, aus Totem Lebendes zu machen, allem Anschein nach daran scheitern, daß wir die nötige Retorte nicht zu erzeugen vermögen. Die organischen Verbindungen entstehen ausschließlich nur in den zarten Geweben der Organismen selbst. Man kann es sich deshalb vorstellen, daß die Erscheinungen der Lebewesen in der Materie sich in wesentlich engeren Grenzen abspielen als die Vorgänge der Physik und schließlich auch die der anorganischen Chemie. Wie die kreisenden Bewegungen der Körper umeinander nur im freien Himmelsraume möglich sind, viele physikalische Vorgänge dagegen nur innerhalb menschlich erzeugbarer Ausdehnungen, die anorganischen Reaktionen nur bei enger Berührung, so muß vielleicht die Materie in noch viel feinerer Zerteilung in so unmittelbarer Nähe aufeinander wirken, wenn organische Verbindungen erzeugt werden sollen, daß menschliche Macht solche allerkleinsten „Retorten“ nicht mehr zu schaffen vermag. Wir erzeugen Schwefelsäure in einer Organisation, die wir als Schwefelsäurefabrik bezeichnen und aus totem Material aufzubauen vermögen. Zur Erzeugung von Eiweiß scheint ein lebender Organismus als „Fabrik“ unbedingt nötig zu sein. Es ist nun die Frage, die wohl ewig unentschieden bleiben wird, ob ein Aufbau aus toter Materie, der genau einem lebenden Wesen entspräche, mit dem nötigen Material versehen, dieses wirklich zu verarbeiten, d. h. zu leben beginnen würde. Wir wissen es nicht, und niemand wird so vermessen sein, zu glauben, daß es unsere Technik dahin bringen wird, den Leib eines lebenden Wesens bis in alle seine Details nachzuahmen, wozu ja auch die Erzeugung organischer Verbindungen wieder nötig wäre, welche das Baumaterial abgeben.

Wir dürfen an dieser einleitenden Stelle diese allerschwierigsten Fragen der Naturerkenntnis nicht weiter verfolgen, auf die wir am Schluß unseres Werkes wieder zurückkommen. Hier sollte nur gezeigt werden, wie ungemein fein die Grenzlinie zwischen der lebendigen und der toten Natur, zwischen den Erscheinungen der Physik und Chemie und denen der Physiologie bei näherem Hinblick wird. Alles scheint darauf hinzudeuten, daß es überhaupt keine ihrem innersten Wesen nach verschiedenen Wirkungen in der gesamten Natur gibt.

Dennoch wäre es voreilig und gefährlich für ein sicheres Fortschreiten unserer Erkenntnis, wenn wir an das nähere Studium der Naturerscheinungen von vornherein mit dieser Voraussetzung gehen würden. Neben diesen Bewegungen und Veränderungen der Materie gehen

mit der Lebenstätigkeit Erscheinungen einher, die wir Empfindung, Bewußtsein, Geist nennen, und die wir, bis jetzt wenigstens, nicht auf Bewegungen oder Veränderungen materieller Teile der Natur *allein* zurückzuführen vermocht haben. Wir müssen jedenfalls vorderhand das Bewußtsein als eine besondere Kraft ansehen, die, zwar auch an die Materie gebunden wie die anderen Naturkräfte, doch wesentlich anderen Bedingungen unterworfen ist. Allem Anscheine nach hängen aber die allgemeinen Lebenserscheinungen eng zusammen mit jener über den sogenannten toten Naturkräften stehenden Empfindungstätigkeit. Wenn irgendwo in der Natur, so scheint hier eine scharfe Grenze gezogen zu sein.

Wir haben damit die Hauptgebiete im großen und ganzen abgeteilt, in denen sich unsere folgenden Betrachtungen zu bewegen haben.

2. Festlegung der Grundbegriffe der Naturforschung.

a) Der Raum und das Urmaß.

Aus den vorangegangenen allgemeinen Betrachtungen geht sofort hervor, daß die Ausdehnungen, in denen die Naturerscheinungen stattfinden, eine sehr wesentliche Rolle für die Art ihrer Betätigung spielen. Die allgemeine Anziehungskraft zeigt sich anders in den Himmelsräumen als in der engen Haarröhre. Es wird also schon aus diesem Grunde nötig sein, über die räumliche Ausdehnung der Erscheinungen möglichst genaue Aufzeichnungen zu machen. Noch wichtiger wird dies, wenn wir zur Ergründung des Wesens einer Kraft ihre bewegende Wirkung messen wollen. Es tritt dann sofort auch der zweite Grundbegriff, der der *Zeit*, hinzu, in welcher die Bewegung stattfindet. Die Naturphilosophen aller Jahrhunderte haben Definitionen dieser beiden Grundbegriffe alles Weltgeschehens gegeben und sich dabei oft in so eigentümliche Ideengänge verwickelt, daß wir ihnen jedenfalls an dieser Stelle nicht folgen können. Wir müssen es uns hier zum Prinzip machen, durchaus von dem Augenschein auszugehen und diesem zu glauben, bis wir durch andere Tatsachen zu besserer Erkenntnis gezwungen werden. Wir wollen sehr gern von vornherein anerkennen, daß der Augenschein trügen kann, ja in vielen Fällen auf das Unzweifelhafteste irregeführt hat. Wir werden deshalb auch in der Folge unsere Anschauungen häufig zu verbessern haben, einen je größeren Kreis von Erscheinungen wir überblicken; aber es wird uns dieser Weg immer noch sicherer führen, als wenn wir von Abstraktionen ausgingen, die in keiner Weise durch die Erfahrung kontrolliert worden sind. Besonders wollen wir uns hüten, die Schlußfolgerungen des reinen Mathematikers bedingungslos anzuerkennen, dessen reine Abstraktionen immer nur unbedingte Gültigkeit in der Welt der Gedanken haben, während es in der Welt der Wirklichkeit niemals möglich ist, die abstrakten Bedingungen, unter denen er seine Formelansätze macht, zu erfüllen: es bleibt immer ein Rest zurück, wie der Bodensatz in der Retorte des Chemikers, wie die persönlichen Fehler in den subtilsten Beobachtungen des Astronomen. In diesen aber verstecken sich oft die wichtigsten Fragen über das Wesen der Naturkräfte. So liegt heute die Entscheidung darüber, ob die Schwerkraft eine Zeit der Fortpflanzung von Himmelskörper zu Himmelskörper gebraucht, noch nahezu innerhalb der Grenzen unserer unkontrollierbaren Beobachtungsfehler.

Der Begriff des *Raumes* selbst ohne einen darin gedachten Körper, an welchem wir seine Dimensionen ausmessen können, ist schon eine solche Abstraktion, die wir vermeiden möchten. Dieser Begriff wäre im buchstäblichen Sinne leer, eben wie ein Buchstabe, der erst mit anderen zusammen einen Gedanken auszudrücken vermag. Wir sagen also kurzweg: Ein räumlich

ausgedehnter Körper hat eine Länge, eine Breite und eine Höhe, also drei Dimensionen. Was von einer vierten Dimension ergrübelt worden ist, kümmert uns hier nicht; wir können sie nicht sehen, nicht greifen, nicht begreifen.

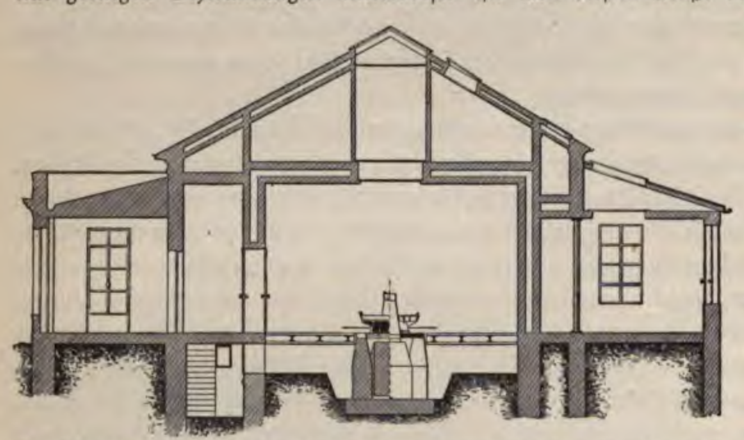
Es wird uns nun in der Folge darauf ankommen, diese drei Dimensionen eines Körpers möglichst genau auszumessen. Denn wir dürfen wohl von vornherein voraussetzen, daß die einem Körper innewohnende Kraft, welche wir zu untersuchen haben, in irgend einer Beziehung zu seiner Größe stehen wird. Etwas ausmessen heißt, die Größe eines Gegenstandes mit der eines anderen Gegenstandes von unveränderlicher Größe vergleichen. Die Unveränderlichkeit dieses Vergleichsmaßes ist hierbei offenbar eine unumgängliche Bedingung. Denn könnten wir auch, um die Wirkungen zweier Körper miteinander zu vergleichen, diese selbst gegeneinander ausmessen, indem wir bestimmten, wieviel größer der eine als der andere ist, worauf es allein ankommt, so ist dies doch nicht mehr möglich, wenn zwischen den zu vergleichenden Wirkungen der beiden Körper ein Zeitunterschied liegt, während dessen sich der eine Körper verändert haben kann; auch wäre es nicht möglich, die nacheinander folgenden Wirkungen eines und desselben veränderlich großen Körpers zu vergleichen.

Da stoßen wir nun von vornherein auf eine unüberwindliche Schwierigkeit. Erfahrungsgemäß ist auch nicht ein einziger Gegenstand in unserer Kenntnis unverändert groß geblieben. Wir glauben zwar in vielen Fällen die Gesetzmäßigkeit ermittelt zu haben, nach welcher solche Größenänderungen stattfinden. Genau genommen aber bewegen wir uns dabei in einem Kreisschluß; denn um diese Größenänderungen zu messen, müßten wir ja zuvor schon das unzweifelhaft konstante Maß besitzen, das wir uns doch erst durch diese Untersuchungen verschaffen können. Wenn wir, um die Aufgabe nach menschlichem Ermessen möglichst genau zu lösen, annehmen, ein Weltkörper wie unsere Erde behalte wenigstens für alle menschlich ausmeßbaren Zeiten seine Größe bei, und nun nach dieser das Urmaß, im vorliegenden Fall also die Länge des Meters, bestimmen (man vergleiche deswegen das Werk des Verfassers „Das Weltgebäude“, S. 450 u. f.), so haben wir eben damit eine unkontrollierbare Annahme gemacht und begeben uns damit für alle Zeiten der Möglichkeit, eine der fundamentalsten Fragen zu entscheiden, ob nämlich die Gesamtkraft der Erde Schwankungen unterworfen sei.

Setzen wir den Fall, die Größe eines Erdmeridians sei mit Hilfe eines Maßstabes von erfahrungsmäßig möglichst unveränderlichem Material ausgemessen und der vierzigmillionste Teil dieses Erdumfanges auf diesem Maßstab als Meter aufgetragen; diese Operation werde mit demselben Maßstab nach einer Reihe von Jahren wiederholt, und man finde nun, daß von ihm eine Anzahl von Einheiten mehr auf den Erdmeridian gehen, so wird nicht zu entscheiden sein, ob inzwischen die Erde größer oder der Maßstab kleiner geworden ist. Wäre gleichzeitig durch astronomische Beobachtungen ermittelt worden, daß die Fallgeschwindigkeit des Mondes gegen die Erde hin zugenommen hat, was durch Zeit- und Winkelmessungen unabhängig von jenem Maßstabe geschehen kann, so wäre es nach den Erfahrungen, die man an den Bewegungen anderer Himmelskörper gemacht hat, wahrscheinlicher geworden, daß die Erde an Masse, also wohl auch an Größe zugenommen, der Maßstab also konstant geblieben wäre. Aber es bliebe noch eine dritte Möglichkeit, daß nämlich die Erde nicht größer geworden sei, aber eine größere Anziehungskraft erhalten habe. Damit wäre eines der scheinbar am sichersten bekannten Gesetze, das von der gänzlichen Unveränderlichkeit der Anziehungskraft, widerlegt, was also nur unter der Bedingung geschehen kann, daß man sich der Unveränderlichkeit des Urmaßes versichert, wozu es indes niemals ein absolut sicheres Mittel geben wird.

Da nun alle sichere Erkenntnis von den Vorgängen in der Natur in erster Linie von der Möglichkeit exakten Messens abhängt, so scheint es also von vornherein erwiesen, daß wir überhaupt nichts Sicheres zu ermitteln im stande sind. Nehmen wir die Dinge absolut, so ist dies in der Tat der Fall, und manchem Forscher mag noch heute „schier das Herz verbrennen" darüber, „daß wir nichts wissen können". Schon hier an der Schwelle unseres Forschungsweges wird es uns eindringlich vorgehalten, daß wir nur alles innerhalb jener Relativität erkennen, die uns unsere menschliche Beschränkung auferlegt.

Dies zugegeben, lassen sich indes nun sogenannte Annäherungsmethoden finden, mit deren Hilfe man allmählich der dem Menschen überhaupt zugänglichen Wahrheit nach aller Wahrscheinlichkeit ungemein nahekommen kann. Für die Meßmethoden kann man z. B. zunächst einen Maßstab aus einem Stoff anfertigen, dessen Größe allem Augenscheine nach nur geringen Schwankungen unterworfen ist. Mit diesem Maße bestimmt man die Gesetze, nach denen die Größenänderungen der Körper stattfinden. Auch diese Gesetze werden nur Annäherungen an die Wahrheit sein, weil die angewendeten Maße noch unsichere sind. Mit Hilfe dieser angenäherten Gesetze bestimmt man die Veränderungen der Maßeinheit während der nun zu wiederholenden Experimente und kann deshalb schon genauere Gesetze ableiten und so fort, bis die Resultate der Untersuchungen sich nicht mehr verändern. Wir müssen es uns wohl vor Augen halten, daß all unser Wissen, welcher Art es auch sei, durch solche Annäherungsmethoden ermittelt worden ist, selbst wenn sich dieses Wissen in sogenannten Abstraktionen bewegt, wie diejenigen der reinen Mathematik. Denn auch diese bedarf der unbeweisbaren Vorannahmen oder Axiome, die nur aus der Erfahrung stammen. Da alle die Schlüsse, welche sich mit Hilfe dieser Vorannahmen aufbauen lassen, bei ihrer Anwendung auf Tatsachen der Erfahrung keinen Widerspruch erfahren, wie millionenfach auch diese Anwendungen gemacht worden sind, so ist ebenso viele Millionen gegen Eins zu wetten, daß diese Grundlage der reinen Mathematik eine richtige ist. Weiter aber ist über sie nichts zu beweisen. Stellt man z. B. das Gesetz auf, zwei Parallelen sollen sich, wenn auch erst in der Unendlichkeit, schneiden können, und es ergibt sich daraus logisch, daß die Körper nicht drei, sondern vier Dimensionen besitzen, von denen die vierte mit unseren Sinnen nicht wahrgenommen werden kann, so ist dies ein für die exakte Naturforschung müßiges, wenn auch noch so interessantes Gedankengewebe, das außerhalb jeder Möglichkeit liegt, es durch unsere allein maßgebenden Annäherungsmethoden zu kontrollieren.



Längsschnitt des Raums für konstante Temperaturen des internationalen Maßbureaus. Nach Guillaume, „Bureau international des poids et mesures." Vgl. Text, S. 13.

Haben wir im Vorangehenden erkannt, wie das Maß das Fundament alles Wissens ist, und wie eine unkontrollierbare Veränderung des Urmaßes deshalb das ganze Gebäude unseres

Wissens ins Schwanken bringen kann, so begreift man, daß man dieses Urmaß als den köstlichsten Schatz der Wissenschaft mit peinlichster Sorgfalt behütet. Ein aus einem Gemisch von Platin und Iridium angefertigter Meterstab wird im Keller eines der beständigen Prüfung der Maßeinheiten gewidmeten internationalen Instituts zu Paris in einem eingemauerten feuersicheren Schrank aufbewahrt, welcher nur gleichzeitig von zwei Mitgliedern der betreffenden internationalen Kommission geöffnet werden kann. Dieses Meter wird nicht mehr als ein festgesetzter Teil des Erdmeridians angesehen, sondern liegt für sich bestehend allen wissenschaftlichen Messungen zu Grunde. Mit Hilfe desselben sollen einmal künftige Forschergeschlechter entscheiden, ob die Gesetze der Natur, auf denen die Ordnung der Welt beruht, in Wirklichkeit das ewig Unveränderliche im ewigen Wechsel des Naturgeschehens sind, wie wir es heute glauben.

Die in den verschiedenen Gebieten der Naturerscheinungen nötigen Messungen geschehen selbstverständlich nicht bloß mit dem Längenmaß. Man hat vielmehr zu den verschiedensten Maßeinheiten greifen müssen, deren Wesen besser erst bei betreffender Gelegenheit näher zu erörtern ist. In allen Fällen aber stößt man auf dieselben praktischen Schwierigkeiten für die Festlegung eines Urmaßes auf ewige Zeiten. Die im praktischen Gebrauch für wissenschaftliche Untersuchungen befindlichen Maße sind heute sämtlich auf das Urmaß des Pariser „Konventionsmeters" zurückzuführen. In einem Raum für konstante Temperatur des genannten Instituts (s. die Abbildung, S. 12) werden die Maßvergleichungen vorgenommen.

b) Das Zeitmaß.

Eine besondere Stellung nimmt jedoch das Zeitmaß ein. Zur Bestimmung der Größe einer Kraftäußerung ist dieses Zeitmaß offenbar immer neben dem Längenmaß nötig. Wollen wir z. B. die Größe der Anziehungskraft eines Körpers auf einen anderen bestimmen, so müssen wir zunächst die Entfernung zwischen beiden messen und dann den Weg, welchen der bewegte Körper in einer gewählten Zeiteinheit gegen den bewegenden zurücklegt.

Ebenso wie man sich über das Wesen des Raumes den Kopf zerbrochen hat, so geschieht dies auch mit dem der Zeit. Uns genügt es, aus der Erfahrung zu wissen, daß es ein Nacheinander der Erscheinungen gibt. Lägen zwischen dem Auftreten einer gewissen Erscheinung und dem einer anderen für unsere Erfahrung keine anderen Ereignisse, an denen wir das sogenannte Zeitintervall zwischen jenen beiden messen könnten, so würde zwischen denselben für uns überhaupt keine Zeit liegen. Die unaufhörliche Aneinanderreihung der Ereignisse in der Natur gibt uns den Begriff der Zeit und kann uns auch allein nur ein Maß derselben verschaffen.

Als Einheit kann man offenbar das Intervall zwischen zwei beliebigen Ereignissen wählen. Man nahm den Tag als solche Einheit an und definierte ihn zuerst als das Intervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden höchsten Sonnenständen an einem und demselben Orte der Erde. Nach uralter Erfahrung schienen diese Intervalle einander völlig gleich zu bleiben, so daß man die Zeiträume zwischen anderen Ereignissen mit ihnen vergleichen, messen konnte. Woher aber hatte man diese Erfahrung? Man vermochte sie nur zu erlangen durch Ausfüllung des Einheitsintervalles mit einer Anzahl von anderen Ereignissen, die unter sich als gleichartig anzusehen waren, so daß bei ihnen der Fundamentalsatz, daß gleiche Ursachen immer gleiche Wirkungen erzeugen, möglichst gut erfüllt war. Aus diesem Bedürfnis entsprang die Erfindung des Zeitmessers, der Uhr.

Die ältesten, einfachsten und doch zugleich relativ genauesten dieser Meßinstrumente waren die chinesischen Wasseruhren. Man maß, wieviel Wasser im Lauf eines durch astronomische Bestimmungen abgegrenzten Tagesintervalles aus einem Gefäß lief, in welchem der Wasserstand

immer auf gleicher Höhe gehalten wurde. Im Grunde kam also die Zeitmessung doch auf eine Längenmessung zurück, durch welche allein die Menge des ausfließenden Wassers bestimmt werden kann. Außerdem mußte man voraussetzen, daß die Schwerkraft, die das Wasser zum Fließen bringt, immer die gleiche bleibt. Auf den gleichen Voraussetzungen beruhen auch noch heute unsere feinsten Zeitmeßmethoden. Kann man zwar unter der alleinigen Voraussetzung des Satzes von den gleichen Wirkungen gleicher Ursachen zeigen, daß ein sich an Länge immer gleichbleibender, an einem Punkt ohne Reibung aufgehängter und in Schwingungen versetzter Stab, ein Pendel, ohne Unterlaß die gleichen Ausschläge in gleichen Zeiten machen muß, wenn die Schwerkraft unveränderlich ist, so gibt es doch keinen Stab, dessen Länge unveränderlich ist; man muß diese durch ein Längenmaß kontrollieren, und dessen Unsicherheit geht also in unsere Zeitbestimmung ein. Wir werden nun später sehen, wie sorgfältig man die Konstruktion und Handhabung des Pendels vornimmt, um allen Fehlerquellen nach Möglichkeit auszuweichen oder sie doch in Rechnung ziehen zu können. Das Pendel ist dadurch wohl zu dem feinsten Meßwerkzeug überhaupt geworden. Immer aber bleiben seine Angaben abhängig von der Unveränderlichkeit der Schwerkraft.

Nachdem die Zeitmesser eine gewisse Vollkommenheit erreicht hatten, bemerkte man, daß zwischen verschiedenen aufeinander folgenden höchsten Sonnenständen keineswegs immer die gleiche Anzahl von Angaben jener Zeitmesser lagen. Es war nun die Frage, ob die himmlische oder die menschliche Uhr falsch ging, oder mit anderen Worten, ob die Schwerkraft konstant sei oder nicht. Von vornherein war offenbar zwischen diesen beiden Alternativen keine Entscheidung zu treffen. Man mußte unabhängige Zeugen anrufen. Deshalb erfand man andere Zeitmesser, deren Tätigkeit nur in sehr geringer und jedenfalls ganz verschiedener Weise durch die Schwere beeinflußt wird, als das Pendel, die Federuhren zum Beispiel; man machte ferner Experimente mit der Schwerkraft, bei denen diese ganz anders wirken mußte, und wurde so überzeugt, daß, wenn die Schwerkraft überhaupt veränderlich sei, dies doch jedenfalls nicht in so hohem Maße der Fall sein könne, um dadurch die schwankende Anzahl der kleineren Zeitintervalle innerhalb der Tageslänge, wie man sie bis dahin definierte, zu erklären. Es war damit entschieden, daß die himmlische Uhr, nicht die unsrigen, falsch ging. Es ist diese Errungenschaft sehr bemerkenswert. Sie zeigt, daß wir unter Umständen unseren menschlichen Einrichtungen mehr Vertrauen schenken dürfen als der ewigen Ordnung der himmlischen Bewegungen, weil wir eben jene unter unseren Händen vielseitiger zu kontrollieren im stande sind. Aus demselben Grund ist man heute überzeugt, daß man mit größerer Sicherheit das Pariser Urmeter auf konstanter Länge erhalten oder doch seine Veränderungen im Laufe der Zeit sicherer konstatieren kann, als die etwaigen Veränderungen in der Größe der Erde.

Um eine aller Voraussicht nach unveränderlichere Zeiteinheit zu gewinnen, als die Länge des wahren Sonnentages sie bot, nahm man dafür die tägliche Umdrehungsdauer der Erde um ihre Achse. Dieses Zeitintervall ist bestimmt durch die Beobachtung zweier aufeinander folgender Durchgänge eines Fixsterns durch eine auf dem Erdkörper feste Ebene, vorausgesetzt, daß dieser Fixstern selbst innerhalb dieser Zeit seine Lage im Raume nicht verändert hat. Aber bei der überall beobachteten Veränderlichkeit aller Dinge im Weltgetriebe nimmt es uns nicht wunder, wenn wir auch die Fixsterne ihre Orte am Himmel, wenn auch sehr langsam, verändern sehen. Es bleibt uns deshalb nichts anderes übrig, als die Beobachtungen mit einer Anzahl von Sternen in den verschiedensten Richtungen des Universums zu wiederholen und weiter anzunehmen, daß die Bewegungen dieser Sterne nichts Gemeinsames haben, so daß die für

jeden einzelnen aus ihrer Eigenbewegung entstehenden Fehler sich im Mittelwert aufheben. Die so bestimmte Länge des sogenannten Sterntages ist die Grundlage unseres Zeitmeßsystems geworden, wenngleich wir aus Gründen der Bequemlichkeit für die bürgerlichen Verrichtungen als eigentliche Zeiteinheit den sogenannten mittleren Sonnentag gewählt haben, der indes mit jenem Sterntag in einem rein mathematischen Verhältnisse steht.

Solange wir dieses „Naturmaß" mit aller Strenge unseren Zeitmessungen zu Grunde legen, haben wir kein Mittel, jemals zu konstatieren, ob die Umdrehungsdauer der Erde um ihre Achse, d. h. die Länge des Sterntages, vorübergehenden oder dauernden Veränderungen unterworfen ist. Viele astronomische Tatsachen sprechen aber dafür, daß die Rotationsdauer aller Planeten sich allmählich beschleunigt, die Tageslänge sich also, wenn auch ungemein langsam, beständig verkürzt. Danach müßten also alle unsere Zeitmessungen einen konstanten, sich mit der Zeit selbst multiplizierenden Fehler besitzen. Verschwindet auch dieser Fehler völlig bei allen für die physikalischen und chemischen Erscheinungen in Betracht kommenden Zeitintervallen, so muß er doch für die Jahrtausende, seit welchen wir bereits Aufzeichnungen über gewisse astronomische Erscheinungen besitzen, merklich werden können. Sind die Naturkräfte, welche diese Himmelserscheinungen hervorbringen, insbesondere also die Schwerkraft, konstant, oder besitzen sie doch keine für uns wahrnehmbare, mit der Zeit fortschreitende Veränderlichkeit, so wird man aus jenen Erscheinungen selbst die Veränderlichkeit unseres Zeitmaßes ableiten können, aber nur unter dieser Annahme, deren Richtigkeit erst noch bewiesen werden muß. Wir sehen aus diesen kritischen Betrachtungen des Grundmaßes der Zeit, daß es auch für dieses sehr erwünscht wäre, wenn wir es in gewissem Sinne von einer in der Natur gegebenen Größe unabhängig machen könnten, wie es mit dem Längenmaße ja bereits geschehen ist. Es wäre von fundamentaler Wichtigkeit für alle exakten Zeitmessungen, die sich über Jahrhunderte hinaus fortsetzen sollen, eine Normaluhreneinrichtung zu konstruieren, welche ein beliebiges Zeitmaß nach menschlichem Ermessen unverändert beibehalten kann. Freilich ist solche Einrichtung weit schwerer zu treffen als für das Längenmaß. Ein Anfang zu einer solchen Organisation könnte auf folgende Weise gemacht werden. Man wählt aus allen Sternwarten, möglichst rings um die Erde herum verteilt, diejenigen Pendel- und Federuhren aus, welche sich als mechanisch möglichst tadellos arbeitende Werke erwiesen haben. Diese Instrumente werden nach den bisher üblichen Methoden mit dem Himmel verglichen und dadurch ihr sogenannter „Uhrfehler" bestimmt. Nun mache man es aber umgekehrt: man sehe diesen Rest nicht als einen Irrtum der Uhr, sondern als einen solchen unserer Voraussetzungen über die Unveränderlichkeit der Tageslänge oder der Schwerkraft an, die auf alle Uhren der Erde in gleicher oder doch ermittelbar verschiedener Weise einwirkt. Man wird diese dann unter der Voraussetzung finden können, daß man die individuellen mechanischen Fehler der Uhren als rings um die Erde herum ohne Gesetzlichkeit eintretend annimmt, soweit nicht die gesuchten Einflüsse veränderlicher Naturkräfte im Spiele sind. Das Mittel der Angaben einer sehr großen Anzahl von Uhren wird dann offenbar von diesen Uhrfehlern frei werden, weil sie mit ebenso großer Wahrscheinlichkeit das Endresultat im einzelnen vergrößern wie verkleinern. Wir wollen, kürzer ausgedrückt, dem Mittel aller dieser durch menschliche Kunst erzeugten Zeitmesser mehr Vertrauen schenken als jenem einen himmlischen. Konstante oder gesetzmäßig sich verändernde Abweichungen zwischen den beiderseitigen Angaben würden wir für Veränderungen des bisher angewandten Naturmaßes erklären dürfen.

Wir sind hier in gewisse Einzelheiten eingetreten, weil sie in recht klarer Weise eine Forschungsmethode veranschaulichen, die für die Ermittelung jeder Wahrheit, insbesondere der

Naturerkenntnis auf allen Gebieten, von grundlegender Wichtigkeit ist. Diese Methode baut sich auf dem sogenannten **Gesetz der großen Zahlen** auf. Es besagt dieses Gesetz weiter nichts, als daß die Aussage von einer sehr großen Zahl von Zeugen, bei denen man nicht annehmen kann, daß sie unter einem gemeinsamen Einflusse stehen, stets mehr Wahrscheinlichkeit für sich hat als die gegenüberstehende Aussage eines Einzelnen, wenn diesem auch noch so viel moralisches Gewicht beizumessen ist. Jeder Einzelne unter der großen Zahl mag sich oder andere über Einzelnheiten täuschen; der gemeinsame Kern aller Aussagen aber entspricht, wenn wir alle auftreibbaren Zeugen benutzt haben, immer derjenigen Wahrheit, wie sie menschliches Können nicht besser zu ermitteln vermag. Je mehr Zeugen dabei Gemeinsames ausgesagt haben, je wahrscheinlicher wird für uns die gefundene Tatsache. In dem oben ausgeführten Falle der Kontrolle des Zeitmaßes wissen wir zwar ganz genau, was für unzuverlässige Geschöpfe menschlicher Unvollkommenheit unsere Uhren und wie wunderbar gleichmäßig die himmlischen Bewegungen sind; aber auf der anderen Seite ist ein kausaler Zusammenhang zwischen allen Uhren der Welt, welcher eine gleiche Abweichung derselben erklären könnte, nicht anders als durch die Vermittelung der Naturkräfte denkbar. Ihre Aussage müßte gegen die erdrückende Mehrheit auch schon aus dem Grunde weichen, weil die Naturkräfte es ja sind, welche in diesem Fall auf der Anklagebank sitzen, da man sie der Veränderlichkeit überführen will. Es ist seltsam und klingt völlig paradox, daß es gerade unsere menschliche Unvollkommenheit, mit der wir unsere Instrumente voller unkontrollierbaren Fehler herstellen, ist, welche uns eine sichere Kontrolle über die allgewaltigen Naturkräfte ermöglicht. Je mehr Beobachtungen, die alle, wie wir wissen, von Fehlern behaftet sind, je mehr dieser Fehler wir also einführen, selbstverständlich unter der Voraussetzung, daß jeder dieser Fehler so klein als möglich gemacht wird, desto sicherer wird das Resultat unserer Untersuchung, weil die Wahrscheinlichkeit, daß positive und negative Fehler sich aufheben, um so größer wird, je mehr dieser Fehler in Rechnung kommen.

c) Die Bewegung.

Durch das Längen- und das Zeitmaß stellen wir die Veränderungen und Bewegungen der Körper infolge der Wirkungen der Naturkräfte fest. Insbesondere wird uns die Messung von **Bewegungen** interessieren, weil die Ortsveränderungen der Körper infolge der auf sie wirkenden Kräfte offenbar am leichtesten eine Messung dieser Kräfte und eine Vergleichung derselben untereinander gestatten werden.

Wir müssen uns deshalb gleich von vornherein darüber einig werden, was wir unter dem Begriff der Bewegung verstehen wollen. Auch dieser Begriff ist nicht so leicht festgelegt, wie man es anfangs glauben möchte, während eine Unklarheit hierüber die unheilvollsten Verwirrungen hervorgebracht hat. Wir dürfen die Bewegungsgröße nicht schlechtweg als die mit der Längeneinheit gemessene Ortsveränderung eines Punktes während eines bestimmten, durch die Zeiteinheit gemessenen Zeitintervalles bezeichnen, obgleich diese Definition meistens gegeben wird. Diese stellt in Wirklichkeit eine Abstraktion dar, die in der Praxis gar keine Anwendung finden kann. Um nämlich diese Ortsveränderung eines Punktes ausmessen zu können, müßte man den Ort, von welchem der Punkt zu Beginn seiner Bewegung ausging, völlig festlegen können, so daß man nach Vollendung der Bewegung zwischen Anfangs- und Endpunkt den Längenmaßstab zu legen vermag. Wir haben aber kein Mittel, einen Punkt oder gar einen Körper auch nur den kleinsten Bruchteil der Zeiteinheit hindurch so zu befestigen, daß er im absoluten Sinne keine Bewegung ausführt, und wir kennen keinen Punkt im ganzen Universum,

der sich während einer abmeßbar kurzen Zeit in Ruhe befände. Solange diese Verhältnisse anhalten, und das wird ewig sein, werden wir absolute Bewegungen also nicht ermitteln können. Um den Begriff der relativen Bewegung, die unserer Forschung allein zugänglich ist, zu umschreiben, müssen wir uns zunächst ein System aus zwei Punkten zusammengesetzt denken, die untereinander, soviel wir ermitteln können, in Ruhe befindlich sind, d. h. ihre gegenseitige Entfernung nicht ändern. Nun erst beginnen wir den einen dieser Punkte zu bewegen und messen diese Bewegung in Bezug auf den in Ruhe (relativ zu dem ersten Orte des bewegten Punktes) gebliebenen zweiten Punkt. Man hat also zur Feststellung einer Bewegung immer drei Punkte zu betrachten: den Ausgangs- und Endpunkt der Bewegung selbst, und einen sogenannten Nullpunkt, von welchem aus die Lage dieser beiden Punkte gemessen werden kann. Daß dieser Nullpunkt mit einem der beiden anderen Punkte zusammenfallen kann, ist selbstverständlich, ändert aber an unserer Definition nichts.

Um die Wirkung einer Kraftäußerung durch eine beobachtete Bewegung zu untersuchen, hat man offenbar nicht nur ihre Größe in der Zeiteinheit, sondern auch ihre Richtung zu bestimmen. Man will wissen, ob die Kraft den beobachteten Körper zu sich hin oder von sich hinweg treibt, oder, wenn sie eine seitliche Bewegung erzeugt, um wieviel diese gegen eine angenommene feste Richtung geneigt ist. Zu dem Nullpunkte tritt also noch ein weiteres Bestimmungselement, die Nullrichtung. Es bewege sich z. B. ein Körper auf einer geraden Linie von a nach b (s. obenstehende Figur). Dann wird man die durchschnittliche Geschwindigkeit des Körpers finden, indem man die Länge der Linie dividiert durch die Zeit, die zur Ausführung der Bewegung nötig war. Diese Länge der Linie ist nur zu messen, wenn man den Anfangspunkt der Bewegung seiner Lage nach festzuhalten vermag, was eben nur durch Vergleichung mit dem Nullpunkt o möglich ist. Zu dem Zweck ziehen wir die Linie $\overline{oa}$, welche man in diesem Falle den Vector von a nennt; wir bezeichnen ihn mit r_1. Ebenso ziehen wir r_2 für den Punkt b. Wenn diese beiden Vectoren und der Winkel w zwischen denselben bekannt sind, so läßt sich bekanntlich aus dem Dreieck oab die Länge der Linie ab durch Rechnung finden. Jener Winkel w aber ist durchaus nur zu bestimmen, wenn sowohl die Anfangs- als die Endrichtung mit einer festen, d. h. an jener Bewegung nicht teilnehmenden Linie, z. B. $\overline{xo}$, vergleichbar ist. (Daß die Winkelmaße, welche wir hier neben den Längenmaßen einführen, insoweit absolute Maße sind, als ihre Einheiten an sich keinen Schwankungen und verschiedenen Deutungen unterworfen sind, darf hier wohl vorausgesetzt werden. Die Unsicherheiten unserer Winkelmessungen können also nur aus Teilungsfehlern der angewandten Instrumente oder aus unkontrollierbaren Veränderungen der Nullrichtung während der Messung entstehen.) Der zwischen der Nullrichtung ox und der Anfangsrichtung oa liegende Winkel w_0 wird in einem besonderen Falle gleich Null. Es muß dies aber stets angegeben werden.

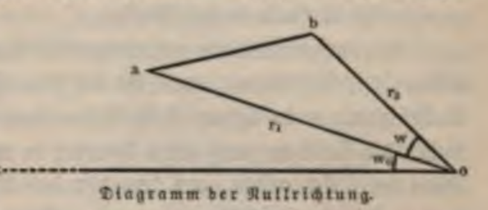


Diagramm der Nullrichtung.

Die auf diese Art in Bezug auf eine ruhend gedachte Nullrichtung gemessenen Bewegungen der Körper sind verschiedener Natur. Die einfachste derselben ist die geradlinig und gleichmäßig schnell fortschreitende. Sie tritt ein, wenn der Körper die kürzeste Richtung zwischen Anfangs- und Endpunkt einschlägt, und wenn auf allen Teilen der Strecke der Quotient des Weges durch die Zeit dieselbe konstante Größe hat. Nennen wir s den in der Zeit t zurückgelegten Weg, so bezeichnen wir diese Bedingung durch die Gleichung $\frac{s}{t}$ = Konstant.

Wir haben die Aufgaben unserer Forschung völlig gelöst, wenn wir im stande sind, jederzeit die Lageverhältnisse aller Körper zu einander anzugeben, denn wir werden im folgenden sehen, daß gewisse Zustandsänderungen, welche wir nicht sogleich als Bewegungsänderungen erkennen, wie die des Wärmegrades oder der Farbe, doch auf Bewegungsänderungen zurückzuführen sind.

Unter der denkbar einfachsten Annahme, daß die Bewegungen der Körper geradlinig und gleichförmig seien, hätte man, wie leicht zu finden ist, für jeden derselben fünf Konstanten zu bestimmen, um eine vollständige Beschreibung aller Zustände der Natur geben und sie ihrem Wesen nach verstehen zu können. In Wirklichkeit aber liegen die Verhältnisse keineswegs so einfach. Bei weitem die meisten Bewegungen zeigen sich veränderlich, sowohl in Bezug auf ihre Größe als auf ihre Richtung. Für den Fall, daß diese Bewegungs- und Richtungsänderungen einer Gesetzlichkeit unterworfen sind, treten dann zu jenen fünf Elementen noch andere Bestimmungsstücke, die sich als Konstanten darstellen lassen. Diese zu finden, ist die Aufgabe der Naturforschung und somit innerhalb des weiter oben umgrenzten Gebietes von Erscheinungen die Aufgabe dieses Werkes.

Alle auf diese Weise gefundenen Bestimmungsstücke sind, wie wir bereits früher erörtert haben, relativer Natur, weil die für jede Untersuchung beliebig gewählte Fundamentalebene, Nullrichtung ꝛc. in keinem Falle sich nachweislich in Ruhe befinden. Angenommen wir untersuchen die Fallbewegung eines Körpers in unserem Laboratorium, so mag als Fundamentalebene der Tisch gelten, auf dem wir das Experiment aufgebaut haben. Wir wissen ganz genau, daß dieser Tisch Bewegungen ausführt, z. B. in 24 Stunden einen Kreis um einen Punkt der Erdachse beschreibt. Wir können aber diese Bewegung gänzlich außer acht lassen, solange die Bedingung erfüllt bleibt, daß alle beteiligten Körper während des Experiments die gleiche Lage zum Erdkörper beibehalten. Dies kann nun zwar in aller Strenge schon deshalb nicht durchgeführt werden, weil ja jedenfalls die Lage des fallenden Körpers zur Erde sich ändert. Bei kleinen Dimensionen des Experiments wird der Einfluß dieser Änderung für unsere Meßmethoden verschwindend klein. Aber wir merken ihn doch, wenn wir das Experiment von einem hohen Turm oder in einem tiefen Schacht ausführen. Der fallende Körper weicht dann nach der Richtung der Erdumdrehung hin von der Lotrichtung ab. Wollen wir jenen Einfluß gehörig ermitteln, so müssen wir offenbar eine Fundamentalebene wählen, welche von der Erdumdrehung unabhängig ist; wir können sie z. B. in den Erdäquator legen und die Nullrichtung vom Erdmittelpunkt nach einem Fixstern ziehen. Um aber die in Bezug auf die erstgewählte Fundamentalebene gemachten Beobachtungen auf die zweite beziehen zu können, ist es nötig, uns von deren Lageänderung zur ersten jederzeit ein genaues Bild zu machen, was durch astronomische Beobachtungen ermöglicht wird. Man sagt dann, daß man die Beobachtungen von einem Koordinatensystem auf ein anderes reduziert. Nun hat sich weiter gezeigt, daß die übrigen Himmelskörper gleichfalls Anziehungskräfte auf alle anderen Körper ausüben, was bei der Ebbe- und Fluterscheinung uns vor allen Dingen vor Augen tritt. Es ist deshalb kein Zweifel, daß die vom Turm herabfallende Kugel in ihrer Bewegung von Sonne, Mond und den übrigen Himmelskörpern abhängig ist. Um diesen Einfluß durch Messung kennen zu lernen, müssen wir unser Koordinatensystem abermals verlegen, indem wir es unabhängig von der Bewegung der Erde um die Sonne machen. Wir legen die Fundamentalebene durch die Erdbahn und den Mittelpunkt der Sonne, und die Nullrichtung von diesem zu einem Fixstern. Die Bewegungen unseres Experimentiertisches zu diesem neuen Koordinatensystem sind nun bereits

recht verwickelte; aber wir sind doch noch im stande, sie rechnerisch zu beherrschen. Damit kommen wir indes an der Grenze derjenigen Bewegungen an, über die wir noch einigermaßen sichere Angaben machen können. Die Astronomen haben aber durch sehr umfangreiche Ermittelungen erkannt, daß die Sonne mit allen an sie durch ihre Anziehungskraft gefesselten Himmelskörpern als Ganzes eine sehr kräftige fortschreitende Bewegung besitzt, deren Größe und Richtung wir indes nur ganz annähernd kennen. Diese Bewegung findet in Bezug auf die übrigen rings um das Firmament herum noch von uns wahrnehmbaren Himmelskörper statt, von deren bei weitem größten Anzahl wir erst seit wenigen Jahrhunderten durch das Fernrohr Kenntnis erhalten haben. Die Notwendigkeit, dem Koordinatensystem eine immer größere Ausdehnung und Unabhängigkeit von den relativen Bewegungen in unserer Nähe zu geben, ist mit der historischen Entwickelung unserer Erkenntnis von den Naturerscheinungen weiter und weiter vorgeschritten. Soweit auch die Forschung im Himmelsraume vordrang, immer wieder hat man gefunden, daß ein körperliches System, dessen einzelne Teile unter sich in Ruhe zu sein scheinen, sich in Bewegung befindet, wenn wir es mit Rücksicht auf das größere System, dem es angehört, betrachten. Es ist deshalb höchst wahrscheinlich, daß die Gesamtheit der Weltkörper, die wir heute oder in einem beliebig anderen Stadium unserer Erkenntnis überblicken, in Bezug auf die Welt außerhalb unserer Erkenntnis eine gemeinsame Bewegung ausführt. Fixieren wir also den Ort, welchen ein Körper in einem gewissen unmeßbar kurzen Zeitabschnitt im Raum innehatte, im Gedanken, so wissen wir auch nicht annähernd anzugeben, in welcher Richtung und wie weit entfernt sich der Ort dieses Körpers von seinem ersten Orte nach einem meßbaren Zeitabschnitte befindet. Dagegen können wir trotz dieser völligen Unkenntnis sagen, daß zwei Teile dieses Körpers, die sich zueinander in Ruhe befinden, um die gleiche, wenn auch unbekannte Größe von ihrem ersten Orte verschoben worden sind, und hierauf kommt es uns im wesentlichen an. Die unbekannte Größe ist für diesen Schluß ohne Belang und läßt sich aus unseren Betrachtungen ausscheiden.

Da Größe und Richtung der wahren Bewegung eines Körpers also nicht zu ermitteln sind, gingen einige Naturphilosophen so weit, an dem Vorhandensein einer absoluten Bewegung der Körper überhaupt zu zweifeln. Uns scheint dies ein Widerspruch in sich selbst. Wenn wir unter absoluter Bewegung etwas verstehen, das dem Wesen nach überhaupt eine Bewegung ist, so setzt der Nachweis einer relativen Bewegung stets auch das Vorhandensein einer wirklichen voraus.

Etwas anderes ist es, wenn man sich fragt, ob es nicht Mittel und Wege gebe, etwas über eine Bewegung zu erfahren, ohne eine Richtung nach einem außerhalb des bewegten Körpers liegenden Punkte zu haben. In diesem Falle könnten wir allerdings Bewegungen noch höherer Ordnung nachweisen, als sie durch direkte Messung zu erkennen sind, und der Frage der absoluten Bewegung so nahe kommen, als es überhaupt möglich ist. Man hat sich in dieser Hinsicht folgende Vorstellung gemacht. Ein Luftballon schwebe innerhalb einer Wolke, so daß keinerlei Fixpunkt für die Feststellung einer Bewegung desselben zu finden ist. Würde sich dieser Ballon nun um sich selbst drehen, so gäbe es zwar kein geometrisches Mittel, dies zu erkennen, aber wir würden trotzdem durch die Beobachtung, daß infolge der Fliehkraft die Gegenstände in der Gondel das Bestreben haben, sich von dem Mittelpunkte der letzteren zu entfernen, auf diese Umdrehungsbewegung schließen, ja, wir könnten sogar die Geschwindigkeit der Rotationsbewegung numerisch bestimmen. In einer ähnlichen Lage wie die Insassen jenes Ballons befinden wir uns offenbar innerhalb jenes Weltgebietes, das wir noch zu überblicken vermögen,

und jenseit dessen sich noch so ungemein viel ausgedehntere Weltschöpfungen befinden können, wie die Erde eine solche darstellt gegenüber unserem Ballon. Aber wir übersehen bei diesem Vergleich, daß wir, um die Bewegung des Ballons festzustellen, Erfahrungen aus der Welt außerhalb des Ballons mit hinübergenommen und verwendet haben. Wäre dies nicht möglich gewesen, so würden wir offenbar im Ballon, der die ganze Welt unserer Erkenntnis darstellt, das Bestreben aller Körper, von seiner Mittelachse hinwegzufliehen, als eine der gesamten Materie überhaupt innewohnende Eigenschaft erklären, die also etwa so wie die allgemeine Schwere, nur entgegengesetzt, abstoßend wirkt.

d) **Kraft und Stoff.**

Man sieht hier, wie ein bloßer Bewegungszustand als eine Kraft auftritt, die von einem Zentrum in gewisser gesetzlicher Weise auszustrahlen scheint. Man wolle nicht mißverstehen, daß hiermit etwa eine Definition der Fliehkraft gegeben werden sollte, deren Ursache ja die Bewegung ist. Es handelt sich vielmehr darum, zu zeigen, daß innerhalb der in unserem Beispiel gesteckten Erfahrungsgrenzen eine Kraft scheinbar unabhängig von irgend einem anderen Agens unmittelbar aus der Materie heraus wirkt, während diese Kraft erst bei weiterer Ausdehnung unserer Kenntnisse sich auf einen gesetzmäßigen Bewegungszustand der gesamten uns vorher bekannten Materie zurückführen läßt, also dem Stoff an sich keineswegs innewohnt.

Diese Betrachtungen führen uns zu der Frage, welche Eigenschaften man dem Stoff an sich überhaupt beizumessen hat. Es ist dies eine Frage, welche von den Philosophen ebenso wie die des Raumes und der Zeit an sich mit großer Spitzfindigkeit behandelt worden ist. Wir, die wir uns soviel wie möglich auf dem Boden beobachteter Tatsachen halten wollen, geben dem Stoff an sich gar keine anderen Eigenschaften als die eines weiteren Buchstaben für den Ausdruck des Naturgeschehens, eines Buchstaben, der an sich keinem fertig gebildeten Begriff entspricht, über den man also nicht weiter nachdenken kann, als eben im Zusammenhange mit den übrigen Buchstaben, in die wir nur unserer Unvollkommenheit wegen die Dinge ebenso wie die Erscheinungen zerlegen müssen. Wir kennen den Stoff nur durch seine Wirkungen auf Dinge außer ihm; diese Wirkungen aber nennen wir seine Kräfte: Es ist unmöglich, das eine ohne das andere zu behandeln. Ein wirkungsloser Stoff ist für uns nicht vorhanden, und eine Kraft, die aus dem Nichts heraus wirkt, widerspricht unseren einfachsten logischen Grundanschauungen und ist außerdem niemals beobachtet worden. Beide Erscheinungen sind also voneinander ganz unzertrennlich, ja man kann denjenigen keinen triftigen Grund entgegenhalten, die behaupten, Kraft und Stoff sei überhaupt ein und dasselbe. Denn auch die einzige Eigenschaft, die dem Stoffe noch bleiben könnte, wenn man alle als Naturkräfte bisher anerkannten Erscheinungsformen von ihm loslöst, die der Raumausfüllung, ist auch als eine Kraft definierbar, indem man annimmt, daß an der Oberfläche eines absolut harten Stoffes eine Kraft wirkt, die stärker als jede auf ihn von außen wirkende Druckkraft und ihr entgegengesetzt ist. Für uns ist auch dies eine Spitzfindigkeit, auf deren Diskussion wir uns hier nicht weiter einlassen können, da sie uns nicht nützlich ist. Der Begriff des Stoffes ist eben eine für unseren Sprachgebrauch notwendige Abstraktion, der wir ebensowenig eine Realität an sich in der Welt der Erscheinungen beimessen können, wie der Bewegung. Wir können von der Bewegung eines Punktes sprechen; in der Wirklichkeit indes bewegen sich nur Körper, und ohne das Vorhandensein von Körpern würde auch keine Bewegung vorhanden sein.

Da der Stoff an sich also eine gedachte, nicht in der Wirklichkeit vorhandene Definition besitzen kann, wie dies auch vom Punkte gilt, der für unsere Gedankenarbeit gleich allen geometrischen Abstraktionen eine durchaus nützliche Anwendung findet, so müssen wir den Stoff uns nun auch vollkommen abstrakt vorstellen. Stoff ist also für uns nur die vollkommene Raumausfüllung eines sonst eigenschaftslosen Etwas, das man noch besser ein Nichts zu nennen hätte, nur mit der Eigenschaft, daß an seinem Orte, der eine Raumausdehnung besitzt, etwas anderes zugleich nicht existieren kann.

Eine andere und ungleich wichtigere Frage ist die, ob die in der Wirklichkeit beobachteten Stoffe als Träger der Naturkräfte den Raum so, wie es der Augenschein lehrt, auch ausfüllen. Diese Frage ist für die gesamte moderne Anschauung von dem Zustandekommen der Naturerscheinungen grundlegend geworden. Sie spaltete noch vor drei oder vier Jahrzehnten, zur Zeit des genialen Fechner (sein Bildnis s. nebenstehend), die Physiker und Naturphilosophen in zwei Lager, die der Dynamiker und der Atomistiker. Die Dynamiker hatten auf jeden Fall den Augenschein für sich. Wenn ein Bleiblock den Hammerschlägen auf den angesetzten Meißel nachgibt und diesen in sich eindringen läßt, so kann man sagen, daß die raumausfüllende Kraft (Dichtigkeit, Härte) des Bleies geringer sei als die des Eisens, dem es unter genügendem Drucke gestatten muß, seinen Platz einzunehmen. Die Atomistiker dagegen behaupten, daß alle Körper aus getrennten kleinsten Teilchen, Atomen, bestehen, die bei nicht absoluter Härte der Körper (also unter allen von uns beobachteten Zuständen) Zwischenräume unter sich übriglassen. Diese Atome sind untereinander, durch die Naturkräfte getrieben, in Bewegung, sowie die Weltkörper umeinander kreisen. Aus den Eigenschaften dieser Bewegungen werden die verschiedenen Zustände und Erscheinungen der Stoffe erklärt. Heute wird man nur noch wenige Physiker finden, die an der Zusammensetzung der Körper aus getrennten Atomen zweifeln. Dennoch werden wir gut tun, zunächst auf dem veralteten Standpunkte der Dynamiker zu bleiben, auf welchen uns der Augenschein stellt, oder ihm doch eine Art von Gleichberechtigung zuzugestehen, um erst, von der Überzeugungsmacht der Tatsachen getrieben, eine Anschauung zu gewinnen, die auf den ersten Blick in der Tat nur sehr wenig Wahrscheinlichkeit für sich hat.



G. Th. Fechner. Nach Werckmeister.

In wie kleine Teile wir aber auch im Geiste den Stoff zerlegen mögen, immer müssen dieselben theoretisch meßbar bleiben, wenn sie meßbare Wirkungen ausüben sollen. Unsere Abstraktion vom Stoff läßt sich deshalb für die atomistische Auffassung vollkommener gestalten als für die dynamische. Denn für diese gibt es überhaupt keinen Körper, der im vollkommenen Sinne raumausfüllend, d. h. absolut hart wäre. Er läßt sich immer wieder teilen. Der Begriff des Stoffes bleibt gewissermaßen ein flüssiger. Der Atomistiker dagegen muß annehmen, daß seine kleinsten Stoffteile nun nicht weiter durch die Einwirkung der bekannten Naturkräfte teilbar, also absolut raumausfüllend sind. Sie haben keine anderen Eigenschaften, als daß sie sich, veranlaßt durch direkte Stoßübertragung von anderen Atomen, bewegen und durch diese Bewegungen die Naturerscheinungen hervorbringen. Welche von beiden Anschauungen die

richtige ist, kann erst durch eine möglichst große Fülle von Einzelerscheinungen erwiesen werden; diejenige Anschauung, welche die meisten Erscheinungen unter den wenigsten Voraussetzungen einheitlich zu erklären vermag, wird dann die größere Wahrscheinlichkeit für sich haben.

Sehr schön hat Fechner in seiner „Atomenlehre" den Gegensatz zwischen jenen beiden Grundanschauungen über den Aufbau der Materie verbildlicht:

„Ein Wald erscheint von fern als eine gleichförmige Masse. Gesetzt, man sähe einen solchen, ohne zu wissen, was es ist, und suche aus der Weise seiner Erscheinung seine eigentliche Beschaffenheit erst zu erkennen. Nun macht sich zwar die Totalwirkung der Stämme und Blätter in sehr augenfälligen Erscheinungen, als Farbe, Wogen im Winde, Rauschen, geltend; aber es ist ziemlich gleichgültig für die Deutung dieser Erscheinungen, ob man den Wald als ein Kontinuum ansehen will oder nicht; oder vielmehr, da er als ein Kontinuum wirklich erscheint, ist die Ansicht, daß er ein solches ist, in offenbarem Vorteil. Gesetzt auch, man bemerkte eine Andeutung der einzelnen Stämme in einem streifigen Wesen, man sähe Tiere in den Wald eindringen und verschwinden, so wäre das eben auch nicht anders, als wenn man die Blätterdurchgänge der Kristalle wahrnimmt und Körper in Flüssigkeiten durch Auflösung verschwinden sieht; man ist deshalb noch nicht genötigt, anzunehmen, daß die Andeutung der Trennung bei näherem Zusehen zu einer wirklichen Trennung werde und eins nur zwischen, statt in das andere eindringt; man ist also auch nicht genötigt, den Glauben an den Augenschein aufzugeben, welcher den Wald wie den Kristall und die Flüssigkeit unmittelbar doch noch als ein Kontinuum erscheinen läßt, und vor allem würde der Physiker sich davor hüten. Nun aber könnte der Physiker es durch feine Beobachtungsmittel vielleicht dahin bringen, die Pulse, welche durch den Schlag der diskontinuierlichen Blätter in der Luft entstehen, die Wellenzüge, welche sich dadurch bilden, daß die Luft zwischen den diskontinuierlichen Stämmen hinstreicht, zu unterscheiden und zur Erklärung derselben genötigt sein, die kontinuierlich erscheinende grüne Laubmasse in einzelne zitternde Teile, die Holzmasse in einzelne Stämme wirklich aufzulösen. Diese feine Untersuchung könnte ein ganz bindendes Resultat geben, aber doch nicht jedermanns Sache sein, und viele, die sich mit diesem Gebiete feiner Untersuchungen nicht beschäftigen, ihnen vielleicht nicht einmal folgen können, es doch einfacher und natürlicher finden, beim unmittelbaren Augenschein stehen zu bleiben, welcher der Erklärung sonst so gut genügte. So ungefähr ist es mit der Atomistik."

Wie wir schon oben andeuteten, erklärt die Atomenlehre jede Kraft als eine Wirkung von Bewegungen der Atome. Der Dynamismus dagegen gibt jedem Stoffe verschiedenartige Kräfte in verschiedenen Abwägungen bei, aus denen ihre Wirkung auf andere Stoffe erklärt wird, soweit es eben geht. Das Wesen der Kraft ist also nach beiden Anschauungen grundverschieden. Nach den Ansichten der Dynamiker strahlt die Kraft ohne irgend eine Zwischenwirkung von dem wirkenden zu dem beeinflußten Körper durch den leeren Raum hinüber, wie man es zum Beispiel heute noch — mangels besserer Erkenntnis — von der Schwerkraft anzunehmen pflegt, und wie man es früher von der Elektrizität, vom Magnetismus, vom Licht, von der Wärme und sogar vom Schall angenommen hat, je nachdem man genügend weit auf die durch Experimente noch unkontrollierten Anschauungen früherer Zeiten zurückgreift. Die Kraft wird hiernach also gewissermaßen in jedem Augenblick im Körper wieder neu erzeugt; denn wie oft auch die Erde den Stein angezogen hat, wird sie es doch immer wieder mit unverminderter Kraft aufs neue tun, und ein heißer Körper würde seine Wärme immerfort beibehalten, wenn nicht eine andere Kraft, die man im dynamischen Sinn als Kälte bezeichnen müßte, entgegengesetzte Wirkung übte. Hat auch, wie gesagt, diese Anschauung den Augenschein für sich, so muß sie doch einer

anderen weichen, welche einfacher, verständlicher, anschaulicher ist. Denn wir können es uns sehr schwer vorstellen, daß eine Kraftäußerung unerschöpflich sein und ohne Vermittelung durch den leeren Raum hindurch wirkt. Die Anschauung der Atomistiker aber ist unter allen Umständen einfacher. Sie schließt sich unmittelbar an den obersten Grundsatz von den gleichen Wirkungen gleicher Ursachen. Sie setzt nur voraus, daß die Atome der Körper von allem Anfang an in Bewegung gewesen seien, wie wir denn alle Körper seit allem Beginn menschlicher Erkenntnis in Bewegung sehen; sie macht weiter die unmittelbar verständliche Voraussetzung, daß an der Stelle, wo sich ein kleinster nicht weiter teilbarer Stoffteil, ein Atom, befindet, sich kein zweites befinden kann, dieses also von der Stelle gehen muß, wenn es mit einem anderen zusammentrifft, das eine größere Geschwindigkeit hat (was im einzelnen noch genauer zu präzisieren ist). Dadurch entstehen verschiedene Gruppierungen, die auf andere, welche mit ihnen zusammentreffen, besondere Bewegungswirkungen ausüben müssen. Hieraus sollen dann alle Naturerscheinungen nach und nach erklärt werden. Wir haben dann eine unmittelbare Aneinanderreihung von Ursache und Wirkung, bis auf eine letzte Ursache, die immer weiter hinausgerückt werden kann, aber doch schließlich übrigbleiben muß, auf die ursprüngliche Bewegung der Teile. Um diese Voraussetzung zu einer denkbar einfachsten zu machen, wäre dann anzunehmen, daß diese Urbewegung aller Teile der unserer Erkenntnis zugänglichen Welt eine gleichförmige und geradlinige war. Wenn es uns Vergnügen macht, können wir über diese noch weiter vermuten, daß sie unserer Welt von der außerhalb unserer Erkenntnis liegenden ebenso mitgeteilt wurde, wie wir eine solche annähernd einem Körper in unserem Laboratorium mitteilen können. Wir haben dann die allerletzte Ursache noch um eine weitere Instanz hinaufgerückt.

Man dürfte aber selbstverständlich dieser bestechenden Einfachheit der Voraussetzungen der atomistischen Anschauung doch keine weitere Folge geben, wenn sie nicht im stande ist, mindestens ebenso viele Erscheinungen zu erklären, als die von der wirklichen Fernwirkung der Kräfte durch die dynamische Hypothese. Ohne alle weiteren Voraussetzungen können wir deshalb an dieser Stelle von dem Wesen der Kraft keine endgültig richtige Definition geben, die erst nach allen den besonderen in diesem Werke vorzunehmenden Betrachtungen aufzustellen ist. Hier können wir nur äußerlich begrenzend anführen, daß die Wirkungen der Naturkräfte in zwei dem Augenscheine nach sehr verschiedene zu zerlegen sind, in die scheinbar oder wirklich fernwirkenden und die, welche nur bei scheinbar oder wirklich unmittelbarer Berührung der betreffenden Stoffteile auftreten.

Da es bei einigen scheinbaren Fernwirkungen, wie beim Lichte, doch sehr bald, auch für die dynamische Anschauung, auf der Hand lag, daß sie durch irgend etwas, das zwischen dem leuchtenden und dem beleuchteten Körper liegen müsse, vermittelt würde, so erfand man den Begriff der sogenannten Imponderabilien, also unwägbarer Stoffe. Die Einführung dieses aus der modernen Physik so gut wie verschwundenen Begriffes ist als eine recht unglückliche zu bezeichnen. Solch ein unwägbares und unsichtbares Etwas ist für uns ebenso unbegreiflich wie die Fernwirkung, welche es vermitteln sollte. Man hatte also ein Unbegreifliches durch ein anderes Unbegreifliches ersetzt. Heute glaubt man, daß jenes vermittelnde Element, der sogenannte Weltäther, aus feinsten Teilchen, noch kleiner wie die gewöhnlichen Massenatome, besteht, die nur praktisch, gegenüber der noch mangelnden Ausbildung unserer Forschungsmethoden, also nicht im absoluten Sinne, sich als unwägbar und unsichtbar erweisen.

Hüten wir uns indes, uns hier in einen Kreisschluß zu verwickeln. Wenn der Äther der Vermittler des Lichtes ist, so daß die Wirkung von Ätherteilchen zu Ätherteilchen und schließlich

durch Berührung mit unserer Netzhaut direkt übertragen wird, so werden diese Teilchen auch, solange sie diese Wirkung ausüben, im absoluten Sinn unsichtbar sein, denn es fehlt ja nun ein weiterer Vermittler, der eine solche Lichtwirkung von ihnen ausgehen lassen könnte. Aus demselben Grunde können diese Teilchen nicht schwer sein, wenn sie allein die Wirkung der Schwerkraft vermitteln. Wir müssen also präziser sagen, die Ätheratome würden wägbar und sichtbar sein, wenn sie sich in Ruhe befänden und andere Ätherteilchen an ihrer Stelle die Vermittelung dieser Wirkungen übernähmen. Der atomistischen Anschauung macht deshalb die Unwägbarkeit und völlige Durchsichtigkeit des Äthers keine Schwierigkeiten, während die dynamische Anschauung, nach welcher der Äther ein zusammenhängendes Ganze zwischen den Körpern ist, die aus sich heraus sonst auf alle anderen Körper z. B. eine anziehende Wirkung üben, für den Äther diese Ausnahmestellung als unbewiesenes und unverständliches Axiom den übrigen hinzufügen mußte.

e) Das Unermeßliche.

Die Imponderabilien führen uns zu der Frage hinüber, wie wir es überhaupt in der Folge mit dem Begriffe der Unendlichkeit halten wollen, der bei den Naturbetrachtungen in beiden Richtungen, der des unendlich Großen wie des unendlich Kleinen, oft verwendet zu werden pflegt. Wir könnten z. B. die sogenannten Imponderabilien als unendlich wenig schwer bezeichnen. Da mit diesen Begriffen ungemein viel gesündigt worden ist, müssen wir uns gleich anfangs darüber völlig klar werden.

Unserem Grundsatze gemäß, nichts von unserer Kontrolle Ausgeschlossenes in diese Betrachtungen aufzunehmen, versagen wir uns jede Erwägung über das vollendete Unendliche nach beiden Richtungen hin. Wir können uns ebensowenig das wahrhaft unendlich Große wie das vollendete Nichts vorstellen. Aber wir werden durch die Atomenlehre insbesondere vielfach gezwungen werden, von etwas unmeßbar Kleinem, anderseits von unmeßbar Großem zu reden, ja, es ist für uns heute gänzlich unerläßlich, mit diesen Begriffen zu operieren. Man wird ohne weiteres einsehen, daß, wenn die Ätherteilchen als unermeßlich klein anzunehmen sind, und wenn dieselben dennoch in Ausübung der Schwerevermittelung einen meßbar großen Körper, einen Stein in unserer Hand, fortzubewegen vermögen, unermeßlich viele von ihnen angreifen müssen, oder daß andernfalls die Gewalt, mit welcher die Partikel den Stein fortschieben, eine unermeßlich große sein muß, wenn die Anzahl jener mitwirkenden kleinsten Teile eine angebbare bleibt.

Die Mathematik lehrt, daß man diesen Begriff des unmeßbar Großen oder unmeßbar Kleinen sehr wohl unter gewissen Vorsichtsmaßregeln in unsere Betrachtungen und numerischen Rechnungen einführen kann. Ein sehr ausgedehnter Zweig der mathematischen Analyse, ohne dessen Hilfe die rechnerische Beherrschung vieler der uns im folgenden interessierenden Vorgänge zum mindesten sehr erschwert, wenn nicht unmöglich würde, die Infinitesimalrechnung, beruht auf der Einführung des in der Sprache der Mathematik sogenannten „unendlich Kleinen". Die sich überhaupt nur in Abstraktionen bewegende reine Mathematik darf den Begriff der Unendlichkeit einführen, für welchen sie das Zeichen ∞ verwendet; in physikalischen Betrachtungen aber sollte dafür besser immer nur „unermeßlich" gesetzt werden. Wenn der Mathematiker berechtigt ist, mit dem Begriff der Null zu operieren oder mit dem absoluten Nichts, so darf er auch die Zahl ∞ gebrauchen, denn jede beliebige endliche Zahl, durch Null dividiert, gibt ∞. Wir brauchen, um dieses einzusehen, ja nur den Nenner eines beliebigen Bruches immer

kleiner werden zu lassen. Wir haben z. B. $2:3 = 2/3$; $2:2 = 1$; $2:1 = 2$; $2:1/2 = 4$; $2:1/1000000 = 2{,}000{,}000$; $2:0 = \infty$.

Multiplizieren wir nun diese letzte Gleichung $2:0 = \infty$ auf beiden Seiten mit Null, so erhalten wir $0 \times 2:0 = 0 \times \infty$. Links können wir aber im Zähler und Nenner die gleiche Zahl 0 wegstreichen: Wir erhalten $0 \times 2/0 = 2$, also auch $2 = 0 \times \infty$: Eine ganze endliche Zahl entsteht aus der Vereinigung von unendlich Kleinem mit unendlich Großem. Auch geometrisch ist dies zu veranschaulichen. Ein geometrischer Punkt ist ohne Dimensionen, also unmeßbar, ein Nichts. Aus Punkten aber denkt sich der Geometer eine Linie zusammengesetzt, also ein Gebilde mit einer Dimension. In jeder endlich langen Linie, sagen wir von 2 cm, müssen sich auch unendlich viele Punkte aneinanderreihen, um sie zu erzeugen; denn wäre die Anzahl endlich, wenn auch noch so groß, so könnte man immer die Ausdehnung jedes Punktes angeben, indem man jene 2 cm durch diese Anzahl dividiert. Solch ein Punkt wäre also im Widerspruche mit seiner Definition. Unendlich viel unendlich Kleines gibt somit im mathematischen Sinn eine endliche Größe.

Der Physiker aber darf in seinen Abstraktionen niemals so weit gehen. Seine Atome sind keine Punkte, da sie einen gewissen Raum ausfüllen sollen, der sogar heute schon unter gewissen Voraussetzungen im Metermaß angebbar ist, worauf wir zurückkommen. Entsteht die Kurve, in welcher ein geworfener Stein zur Erde fällt, durch die Einwirkung einer einmaligen stoßweise ausgeübten Wurfkraft in Verbindung mit der Anziehungskraft der Erde, und ist diese Anziehungskraft ihrerseits eine Folge von unermeßlich vielen in unermeßlich kleinen Zeitzwischenräumen auf den Stein ausgeübten Atomstößen, so wird der Stein in Wirklichkeit keineswegs auf einer gleichmäßig gekrümmten Kurve, im gegebenen Fall auf einer Parabel, sich bewegen, wie sie der Mathematiker aus seiner Abstraktion von der Unendlichkeit heraus konstruiert, sondern auf unermeßlich oft gebrochenen geraden Linien, deren durchschnittliche Lage die mathematische Kurve angibt. Es ist deshalb gar kein Zweifel darüber (wiewohl dies unseres Wissens noch nirgends deutlich ausgesprochen wurde), daß die mit so ungemeinem Scharfsinn ausgebildete Infinitesimalrechnung, die der Physiker bei allen seinen subtilsten theoretischen Untersuchungen als exakte Wiedergabe der wahren Zustände ansieht, doch in Wirklichkeit nur Annäherungen an dieselben, Mittelwerte, geben kann, wenn die Atomenlehre bis in ihre letzten Konsequenzen anerkannt wird.

Ganz anders stehen die Dinge dagegen bei der dynamischen Anschauung. Für sie ist der Äther ja etwas völlig Ununterbrochenes; er wirkt also auch ganz und gar kontinuierlich, wie es der Mathematiker bei der abstrakten theoretischen Untersuchung der Kräftewirkung immer noch annimmt. Die Theorie steckt also in gewissem Sinne noch in veralteten Anschauungen, die sie aus praktischen Gründen vorderhand nicht verlassen kann. Man wird aber einmal zu der Überzeugung gelangen, daß man durch praktische Summationen von Wirkungen der Wahrheit näher kommt als durch ein noch so sicher auf theoretischem Weg abgeleitetes „Integral", das auf mathematischem Wege diese selbe Summation vornimmt. Der Physiker insbesondere muß bei aller Anerkennung der großen Hilfleistungen, die ihm die Theorie, namentlich für die Erlangung großer Überblicke, bietet, im wesentlichen ein Praktiker bleiben.

Diese Betrachtungen lehren auch zugleich, daß die sogenannten Annäherungsmethoden, auf welche wir in den meisten Fällen zur Erforschung der Wahrheit angewiesen sind, und die man allgemein als bloße Notbehelfe ansieht, in der Tat den einzigen Weg zeigen, die Wahrheit wirklich vollkommen zu erreichen, wenigstens unter der Voraussetzung, daß hinter den endlich großen Atomen, deren Anzahl in dem endlich großen Gebiete, das unserer Erkenntnis immer

nur zugänglich sein wird, auch endlich groß sein muß, sich also nicht noch etwas Unendliches, für uns gänzlich Unzugängliches versteckt. Wir wagen damit den ebenso überraschenden wie unanfechtbaren Ausspruch, daß gerade die vollkommenste Theorie nur eine Annäherung an die Wahrheit ist. Es bedeutet dies eigentlich nichts weiter, als was wir schon zu Anfang unserer einleitenden Betrachtungen hervorgehoben haben, und was überall im besonderen wieder hervortrat: daß die unbedingte Anwendung jeder Art von Abstraktion in der Praxis vom Übel ist.

Die in diesen einleitenden Betrachtungen festgelegten Gesichtspunkte sollen nun die Richtschnur abgeben, an der wir aus dem Gewirr der uns umgebenden Naturerscheinungen die unveränderlichen Gesetze der Natur erkunden wollen.

3. Die Rolle der Sinneswerkzeuge für die Naturforschung.

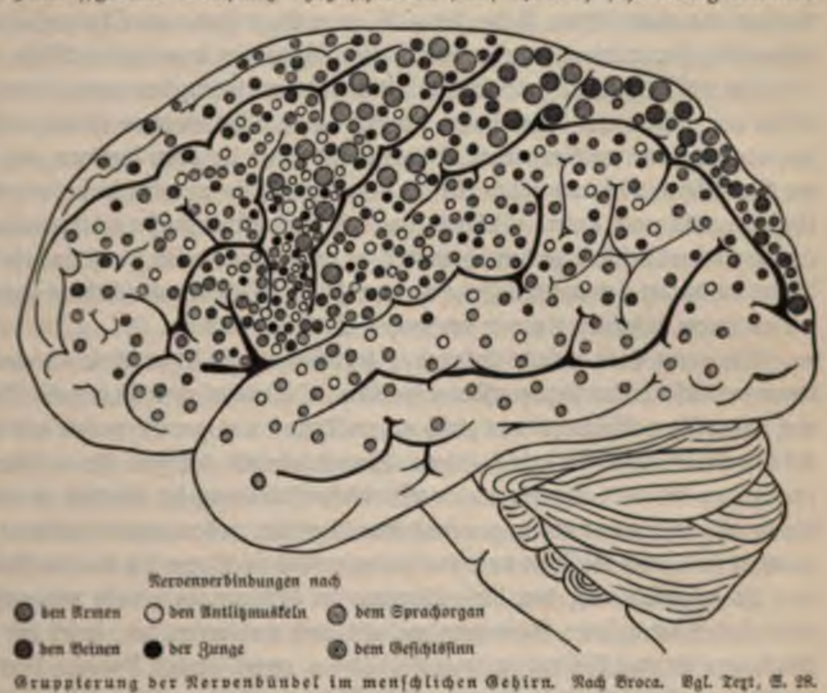
Ehe wir an die spezielle Beobachtung der Naturerscheinungen herantreten können, müssen wir uns darüber klar werden, auf welchen Wegen uns diese Erscheinungen zum Bewußtsein kommen, und wie wir uns versichern können, ob das Urteil unserer Sinne darüber zuverlässig ist.

Alle Erkenntnis geht ja durch die Pforten unserer Sinne, die die einzigen Vermittler zwischen der Außenwelt und unserem die Eindrücke aufnehmenden und ordnenden Geiste sind. Jeder Vermittler aber ist mehr oder weniger unzuverlässig und mischt von seiner eigenen Individualität etwas in seinen Bericht. Das Leben beweist uns täglich, daß die Sinne groben Täuschungen unterworfen sein können; aber gerade diese Erkenntnis zeigt auch wieder, daß uns zuverlässige Mittel zu Gebote stehen, diese Täuschungen aufzudecken. Um diese Kontrollmittel von vornherein kennen zu lernen, müssen wir uns mit dem Apparat unserer Erkenntnis schon vorweg beschäftigen, ehe wir die Kräfte selbst betrachten, durch welche die Sinneseindrücke hervorgebracht werden. Wir müssen also wieder ein Annäherungsverfahren anwenden. So verstehen wir z. B. die Einrichtungen des Auges erst dann recht, wenn wir das Wesen des Lichtes erfaßt haben, aber wir müssen doch, ehe wir dieses Wesen ergründen können, wissen, wie der Eindruck des Lichtes in uns überhaupt entsteht.

Daß die äußeren Sinnesorgane, die fühlende Haut, der Mund, die Nase, das Ohr, das Auge, wirklich nur die Vermittler für unsere Empfindung des Sehens, Hörens ꝛc. sind, d. h. nicht selber sehen, hören ꝛc., beweist uns der Physiolog auf das unzweideutigste. Er zeigt uns, daß z. B. vom Auge eine Verbindung, ein sogenannter Nervenstrang, nach den inneren Teilen unseres Gehirnes führt, und daß wir blind werden, wenn diese Verbindung unterbrochen wird, während das Auge nach wie vor sein Bild von der Außenwelt auf die unveränderte Netzhaut wirft. Umgekehrt haben wir die deutliche Empfindung von Licht, wenn wir auf irgend eine Weise jenen Sehnerv reizen, ohne daß dem Auge Licht zugeführt wird. Ein sehr einfaches Experiment wird uns hiervon überzeugen. Man nehme einen Zinkstreifen und den Stiel eines silbernen Löffels so in den Mund, daß beide dort getrennt liegen, und bringe nun die draußen befindlichen Enden der beiden Metallstücke in Berührung. Dann wird man jedesmal bei geschlossenem Auge den Eindruck eines schwachen Blitzes oder Wetterleuchtens haben. Durch jene Berührung kommt nämlich ein sehr schwacher elektrischer Strom zu stande, der jedoch immerhin noch stärker ist als die in den Nerven erzeugten oder dort arbeitenden Ströme. Er teilt sich der Umgebung des Mundes und dem dort vorüberziehenden Sehnerv in seiner ganzen Ausdehnung mit und erzeugt dadurch jene scheinbare Aufhellung des gesamten Sehfeldes. Aber keineswegs ist hierzu ein elektrischer Reiz nötig. Auch ein Druck auf den Sehnerv

genügt dazu, wie mancher weiß, der einmal einen heftigen Schlag ins Gesicht erhalten hat. Ganz entsprechend verhält es sich mit allen anderen Sinnesorganen.

Unsere Bewußtseinstätigkeit vollzieht sich also in unserem Gehirn, und zwar, wie nachgewiesen werden konnte, in der grauen Hülle, die die vielverschlungenen Windungen des weißen Gehirnes äußerlich umgibt, während dieses letztere aus den äußerst feinen Nervenfasern besteht, die, zu Strängen vereinigt, einerseits zu den Sinneswerkzeugen, anderseits zu den motorischen Nerven führen, die entweder infolge direkter Sinnesreizungen oder durch unseren Willen Äußerungen unseres Körpers veranlassen. Welche besonderen Funktionen dabei den einzelnen Teilen jener „grauen Substanz“ zuzuschreiben sind, ist noch sehr wenig bekannt. Jene die letzten Tiefen unserer Geistestätigkeit offenbar irgendwie in der Körperwelt vertretenden Organe verschließen sich so eng in unserem Körper, daß es uns schwieriger ist, über diese Verkörperungen unseres ureigensten Ichs Beobachtungen anzustellen, wie über Welten in den äußersten Regionen des Universums. Wir können nur Vermutungen darüber aufwerfen. Es ist indes für die Entwickelung unserer Anschauungen über die Einheitlichkeit des Naturgeschehens äußerst wichtig, die gemeinsamen Züge in den Aufnahmeapparaten unserer Erkenntnis zu überblicken.



Gruppierung der Nervenbündel im menschlichen Gehirn. Nach Broca. Vgl. Text, S. 28.

Es fällt uns dabei zunächst auf, daß die aus einer unzählbaren Menge allerkleinster Gehirnzellen bestehende graue Substanz, das Endorgan jenes Aufnahmeapparats, nirgends irgend eine Verschiedenheit seines Aufbaues oder seiner sonstigen Beschaffenheit verrät. Nun ist es aber keinem Zweifel unterlegen, daß gewisse Partien dieser grauen Gehirnrinde nur ganz bestimmte Sinneseindrücke zu empfangen vermögen, daß wir also im eigentlichsten Sinne mit gewissen Teilen der Gehirnrinde ausschließlich sehen, mit anderen fühlen 2c. Sobald diese Partien jener Gehirnhaut erkranken und verkümmern, treten ganz bestimmte Störungen unserer Sinnesfunktionen ein, wie Obduktionen ergeben haben. Freilich hat man sich diese „Lokalisationen“ der Gehirntätigkeit heute nicht mehr so zu denken, wie es die alte Phrenologie annahm, nach der die verschiedenen geistigen Eigenschaften in bestimmten Gebieten des Gehirns vereinigt waren. Der Bau des Gehirns ist viel feiner und sorgsamer ausgeführt. Die großen

Nervenstränge, die von den äußeren Sinnesorganen ausgehen, verzweigen sich wie Bäume und endigen an sehr verschiedenen Stellen der Gehirnrinde. Die Nervenzweige und Fasern von anderen äußeren Sinnesorganen durchschlingen sich vielfach und gruppieren ihre Endzellen neben denen der anderen Verzweigungen. Die auf S. 27 stehende Abbildung nach Broca gibt einen Begriff von den so entstehenden Gruppierungen. Es wird dadurch bewirkt, daß durch lokalisierte Erkrankung von Gehirnteilen immer nur kleine Teile ein und derselben Sinnesfunktion unterbrochen werden können; dann aber scheint hierdurch eine sehr wichtige Eigenschaft unseres Geistes bedingt zu sein, die uns ein Gesamtbild einer durch verschiedene äußere Sinnesorgane auf uns wirkenden Erscheinung verschafft. Die in benachbarten Regionen der Gehirnrinde eintreffenden Reize, die z. B. vom Auge und vom Ohr zugleich ausgehen, vereinigen sich hier miteinander oder beeinflussen sich doch in irgend einer Weise.

Die völlig gleichartige Beschaffenheit der Gehirnrindenzellen regt zu seltsamen Gedankenreihen an. Wenn wir bei näherem Einblick in das Naturwalten immer mehr zu der Überzeugung von einer vollkommenen Einheitlichkeit seiner Ursachen kommen, die sich im Getriebe des Weltgeschehens so unendlich vielfach verzweigt, so stoßen wir hier in der geheimnisvoll verschlossenen Kammer unseres Gehirns, wo alle diese Erkenntnisse zusammenlaufen und sich zu einem großen Weltbild einheitlich wieder zu gruppieren streben, auf eine elementare Einheitlichkeit an diesem tiefinnersten Ende der unendlichen Kette des Geschehens und der Wirkungen, wie an jenem äußersten Ende in der großen Welt der Materie.

Die ganze Welt unserer Erkenntnis setzt sich also in letzter Linie aus dem Spiel der Erregungen dieser letzten Nervenzellen zusammen. Die Gehirnrinde ist wie eine Art von Klaviatur aus ungezählten Millionen von gleichartigen Tasten, und gewissermaßen nur die verschiedenen Akkordverbindungen der gleichzeitigen Sinneseindrücke bringen die verschiedenartigen Anschauungen hervor. Die für uns verständliche Abbildung der Welt in unserem Inneren geschieht also in Form eines ungemein feinen Mosaiks, dessen einzelne Elemente zunächst völlig getrennt sind: auch die Welt unseres Geistes zerfällt in Atome wie die der Materie.

Es zeigt sich nun, daß diese Elemente der Gehirnrinde sowohl von außen her, infolge eines Reizes der äußeren Sinnesorgane, als auch von innen her, durch die geheimnisvollen Wirkungen unseres Willens, unserer Einbildung, erregt werden können. Von außen her wird der Nervenreiz eingeleitet durch mechanische Einwirkungen von der gröbsten bis zur allerfeinsten Art. Wir empfinden die mechanische Einwirkung von Körpern bis zu einer gewissen Minimalgröße auf unserer Haut als Druck u. s. w. Feinere Bewegungen der Materie werden nacheinander als Schall, Wärme, Licht empfunden; denn es ist heute ziemlich sicher, daß das Sehen nicht in erster Linie durch einen chemischen Prozeß in unserem Auge ähnlich wie in der photographischen Camera zu stande kommt, sondern durch eine direkte mechanische Einwirkung der Atomstöße der Ätherwellen des Lichtes auf die ungemein feinen Sehzapfen der Netzhaut, wenngleich der immer noch recht geheimnisvolle Sehpurpur, der die lebende Netzhaut bespült und sich unter der Einwirkung des Lichtes schnell entfärbt, gewiß eine Rolle bei diesem Vorgange spielt.

Die mechanischen Einwirkungen an den äußeren Endpunkten des Nervensystems setzen sich nun teils in chemische Arbeit, teils in elektrische Erregung um, welch letztere sich dem ganzen betreffenden Nervenzweige mitteilt und den Reiz bis zur Endzelle in der Gehirnrinde überträgt. Unsere Anschauung von den realen Dingen der Außenwelt wird also durch einen von außen nach innen gerichteten Nervenstrom vermittelt.

Da wir uns nun früher stattgehabte Kombinationen von Nervenreizen wieder vorstellen, sie also in uns nach Belieben, wenn auch unter normalen Verhältnissen schwächer, bei krankhafter Reizung aber selbst bis zur Vorspiegelung völliger Wirklichkeit, wieder erzeugen können, so müssen wir annehmen, daß unser Wille im stande ist, einen umgekehrt gerichteten Nervenstrom durch primäre Reizung der betreffenden Gehirnrindenzellen hervorzurufen. Es würde diese Wirksamkeit in beiden Richtungssinnen ein Gegenstück in dem System der motorischen Nerven finden, dessen Aufbau, soweit die Vergleichung möglich ist, mit dem der Empfindungsnerven völlig übereinstimmt. Die sogenannten Reflexbewegungen, die wir nach stattgefundenem Nervenreize unwillkürlich ausführen, geschehen so, daß der durch den äußeren Reiz erzeugte Nervenstrom zunächst nur bis zu gewissen Zentralpunkten außerhalb der Gehirnrinde, meist im Rückenmark, gelangt und sich dann sofort vielverzweigt wieder nach außen hin den Muskeln mitteilt, welche die oft recht verwickelten Bewegungen ausführen, die der äußere Reiz auslöste, ohne daß er uns zum Bewußtsein zu kommen braucht. Von diesen Bewegungszentren im Rückenmark gehen zwar Nervenstränge bis zu unserer Gehirnrinde empor, doch sind wir im stande, bis zu einem gewissen Grade des äußeren Nervenreizes die Verbindung mit unserem Bewußtseinsorgan willkürlich zu unterbrechen. Da nun die durch den äußeren Reiz erzeugte Wirkung auf die motorischen Zentren immer einer ganz bestimmten mechanischen Kraft entspricht, die sich ohne gleichgroße Gegenwirkung dem nach den Bewußtseinszentren führenden Nervensträngen mitteilen müßte, und anderseits diese Gegenwirkung durch unseren freien Willen erzeugt wird, so können wir, theoretisch genommen, diese unsere Willenskraft nach mechanischem Maße messen, mit einer gewissen Zug- oder Druckkraft in Kilogrammetern per Sekunde angeben. Nur praktisch stellen sich wegen der ungemeinen Schwäche der experimentell zuerst von Dubois-Reymond nachgewiesenen Nervenströme heute noch unüberwindliche Schwierigkeiten dieser Messung der in unserem Gehirn nach unserer Willkür entspringenden Kraft entgegen.

Es ist aber durchaus denkbar, daß der von innen nach außen wirkende Nervenstrom der „Erinnerung" so stark werden kann, daß die Umkehrung vollkommen stattfindet und z. B. durch denselben die Sehzapfen der Netzhaut wieder in derartige schwingende Bewegung versetzt werden, wie sie den Lichtschwingungen des wirklichen Bildes entsprechen. Die Erinnerung würde dann ein sichtbares Bild des Gegenstandes auf der Netzhaut wieder erzeugen. Es wäre der Mühe wert, dies experimentell zu erforschen. Wird doch auch die Netzhaut durch nervöse Anregung selbstleuchtend, wie dies die in der Nacht „glühend" werdenden Augen vieler Tiere zeigen, eine Erscheinung, die auch beim Menschen beobachtet worden ist.

Wir sind an dieser Stelle, immer noch mit Grenzbestimmungen unseres Forschungsgebietes beschäftigt, aus gewichtigen Gründen etwas näher auf die Mechanik unseres Vorstellungsvermögens eingegangen und uns dabei klar geworden, daß alles, was wir von der Welt außer uns und der in uns wissen, durchaus nur aus entsprechenden Zustandsänderungen unseres eigenen Körpers zu erfahren ist. Es ist dies eigentlich ganz selbstverständlich, da wir ja nicht aus uns selbst herausgehen können. Dennoch hat man auch hieran wieder tiefsinnige philosophische Betrachtungen geknüpft, indem man sich vorstellte, daß die Dinge selbst, die jene Reize auf die äußeren Endorgane unseres Nervensystems üben, ganz anders beschaffen sein könnten, als sie unseren Sinnen erscheinen. Auch das unterliegt keinem Zweifel. Wir haben ja gesehen, daß dasjenige, was wir die reale Außenwelt nennen, sich von der nicht realen Innenwelt streng genommen nur dadurch unterscheidet, daß im ersteren Falle der unsere Vorstellung erzeugende Reiz in den sogenannten äußeren Sinnesorganen beginnt und in den inneren

endigt, im anderen Fall umgekehrt. Wir haben aber, wenn wir von den Dingen außerhalb unserer Sinneseindrücke nichts wissen, gar keinen Grund, anzunehmen, daß dem innersten Wesen nach die von außen her kommenden Reizungen eine andere letzte Ursache hätten als die von innen kommenden, mit anderen Worten: wir haben in der Tat kein Mittel, nachzuweisen, daß die sogenannte Außenwelt nicht ebensogut eine eingebildete Welt ist wie die in unserem Inneren, so daß sich beide nur durch die Intensität der von ihnen hervorgerufenen Eindrücke unterscheiden. Die sogenannte Außenwelt ist die stärker, die Innenwelt die schwächer, traumhaft wirkende.

Aber wir müssen bei konsequenter Durchführung dieses Gedankens doch zugeben, daß es sich dabei wieder, wie in so vielen Fällen, um philosophische Wortspiele handelt. Wenn die Welt wirklich nur Wille und Vorstellung wäre, es also überhaupt keinen Unterschied im innersten Wesen der Innen- und Außenwelt gäbe, so gibt es doch offenbar überhaupt nur ein einziges Individuum, das alles in sich enthält, was wir die Welt nennen. Dieses Individuum ist also die Welt selbst, sei sie eingebildet oder reell, und diese Welt zerfällt in Einzelwirkungen, die wir menschliche und andere Individuen, Körper u. s. w. außerhalb jener Einzelindividuen nennen, und diese Einzelwirkungen sind es nun, die uns interessieren und die wir näher untersuchen. Wir sind, uns im Kreise drehend, wieder auf unseren einfachen Ausgangsstandpunkt zurückgekommen, der uns sagt, daß wir darüber nicht hinauskommen, diejenigen Dinge als tatsächlich anzunehmen, für welche eine genügende Zahl von übereinstimmenden Sinneseindrücken Zeugenschaft ablegt.

Um diese Zeugenschaft möglichst vielartig zu gestalten, d. h. den bedenklichsten Fehler gleichartiger Beeinflussung einer ganzen Reihe von Aussagen nach Möglichkeit auszuschließen, sind dem Menschen verschiedenartige äußere Sinnesorgane verliehen, mit denen er die Erscheinungen von verschiedenen Standpunkten aus prüfen kann. Inwieweit diese verschiedenen Sinne der Naturforschung dienen und für ihre Aufgaben sich zuverlässig erweisen, muß hier vorweg geprüft werden.

Von alters her werden dem Menschen fünf Sinne zugeschrieben, das **Gefühl**, der **Geruch**, der **Geschmack**, das **Gehör** und das **Gesicht**. Jeder dieser Sinne besitzt bekanntlich seine besonderen Aufnahmeorgane, die durchaus abweichend von den Endorganen in der Gehirnrinde für jeden Sinn sehr verschieden gebaut sind. Dies gilt indes doch nur von den eigentlichen äußeren Aufnahmeapparaten, dem Auge, dem Ohr 2c. Die Enden der Nervenfasern, bei denen die Erregung des nach innen führenden Nervenstromes beginnt, sind für alle Sinne wenn nicht völlig gleich, so doch auffallend ähnlich. Im wesentlichen sind nur die Art der Gruppierung dieser äußeren Endelemente des Nervensystems und ihre Größe für die verschiedenen Sinnesorgane verschieden. Es sind also die eigentlichen Aufnahmeapparate, das Auge, das Ohr u. s. w., welche die Auslese der verschiedenen Sinneseindrücke besorgen, die wir als Licht, Schall u. s. w. auffassen. Das Auge konzentriert eben nur Lichtstrahlen, und die Zapfen und Stäbchen der Netzhaut sind durch ihre Größe so abgestimmt, daß sie nur durch die Lichtschwingungen des Äthers in Erregung versetzt werden können. Das Entsprechende findet bei den übrigen Sinnesorganen statt. Im übrigen ist die weitere Übertragung der Reize bis zu den inneren Organen, den Gehirnzellen, für alle Sinne die gleiche. Es scheint also, daß unser Erkenntnisvermögen die verschiedenen Arten von Naturerscheinungen nur dadurch voneinander unterscheidet, daß ein an sich gleichartiger Reiz der inneren Organe von den verschiedenen äußeren Organen ausgeht und für jedes der letzteren auch wieder an bestimmten Punkten der Gehirnrinde endigt.

Die Auslese der Sinneseindrücke, welche unserem Erkenntnisvermögen zur Verarbeitung übergeben werden, hängt also vollkommen von der Einrichtung unserer äußeren Sinnesorgane ab. Wir werden später sehen, daß die meisten Naturerscheinungen der Materie oder des Äthers durch Schwingungen hervorgebracht werden. Die Geschwindigkeit dieser Schwingungen muß innerhalb ganz bestimmter Grenzen bleiben, damit sie das Auge als Licht zu konzentrieren vermag; andere Geschwindigkeiten bei der Wiederholung der Stöße der Ätheratome bringen auf unserer Haut das Gefühl der Wärme hervor. Die abermals bedeutend langsameren Erzitterungen der Luft erzeugen die Empfindung des Schalles in unserem Ohr. Alle diese Geschwindigkeiten sind mit völliger Sicherheit zu bestimmen, worauf wir im folgenden noch eingehend zurückkommen. Es hat sich dabei ergeben, daß zwischen den Schwingungsgeschwindigkeiten, die für uns eine Schallerscheinung hervorbringen, und denen, die Wärme empfinden lassen, ferner zwischen den Wärmeschwingungen und denen des Lichtes große Lücken vorhanden sind, und daß es Schwingungen gibt, die noch schneller sind als die des Lichtes, ohne auf unsere Sinne irgend einen Eindruck hervorzubringen. Es ist nun schon von vornherein wahrscheinlich und auch durch das Experiment nachgewiesen, daß die jenen Lücken entsprechenden Schwingungszustände vorhanden sind. Man kann sie unter Umständen dadurch erkennbar machen, daß man ihnen Widerstände entgegensetzt, welche die Schwingungsdauer bis zu einem Grade verlangsamen, der sie in den Bereich eines Sinnes bringt.

Das Naturgeschehen setzt sich zweifellos aus einer ununterbrochenen Reihe von Bewegungszuständen der Materie zusammen, von denen wir, wegen der lückenhaften Auslese durch unsere Sinne, nur einen Teil unmittelbar wahrzunehmen vermögen. Allein nur durch die spezifischen Eigenschaften unserer äußeren Sinnesorgane haben wir diese ununterbrochene Reihe von Bewegungszuständen in scheinbar scharf getrennte Gruppen zerlegt, die wir Licht, Wärme, Schall u. s. w. nennen. Nur infolge der besonderen Einrichtungen unserer Sinnesorgane erscheinen uns diese Wirkungen so wesentlich voneinander verschieden, während es sich um verwandte, nur in der Geschwindigkeit gesteigerte Bewegungsformen handelt. Die Zerlegung der Naturerscheinungen in die bekannten Naturkräfte Licht, Wärme, Schall u. s. w. ist also nur durch die besondere Art unserer äußeren Sinnesorgane bedingt. In der Verfolgung der Aufgabe, die Einheitlichkeit im Naturgeschehen zu ergründen, befinden wir uns etwa in derselben Lage wie ein Künstler, der die Harmonien eines musikalischen Werkes aus dem Vortrag auf einem unvollkommenen Instrumente, das nur eine Reihe von Tönen ganz unten, in der Mittellage und ganz oben besitzt, wohl herausfühlt, dem es aber große Schwierigkeiten bereitet, die für ihn stummen Töne im Geiste zu ergänzen, um das Kunstwerk in seiner Einheitlichkeit völlig kennen zu lernen.

Würden wir auch für diese zwischenliegenden Schwingungen ein empfindendes Organ haben, so würde sich das Bild der Welt zweifellos wesentlich vollkommener darstellen, in demselben Verhältnis etwa, wie ein sehend gemachter Blinder die Welt vollkommener erkennen wird als vorher in seiner Blindheit. Viele Erscheinungen, deren Zusammenhang mit der Gesamtheit des Naturgeschehens uns noch rätselhaft erscheint, fügen sich dem einheitlichen Bilde dann leicht ein. Das ganze Bild der Natur, so wie es sich unseren Sinnen darstellt, erschiene wesentlich verschieden. Aber wir dürfen doch nicht so weit gehen, wie es einige Philosophen getan haben, daß wir fürchten, die bisher vorliegenden Erfahrungen über das Weltgeschehen und der Schatz unseres Wissens über die Natur würde durch die neuen, von einem neuen Sinnesorgan vermittelten Erfahrungen völlig über den Haufen geworfen werden können, unser Wissen sei

also überhaupt nur ein Produkt unserer Sinnesorgane, auch wenn wir nicht daran zweifeln, daß es eine Außenwelt gibt. Der Vergleich mit dem Blinden wird in dieser Hinsicht lehrreich sein. Setzen wir den Fall, er verstehe ein Musikinstrument, sagen wir Klavier, zu spielen. Der Abstand der Tasten, die Größe und Form seines Instrumentes sind ihm so genau bekannt, daß er sie, z. B. auf einem eingekerbten Maßstabe, ganz genau angeben kann. Er kennt die Wirkung der Töne bei bestimmtem Anschlage der Tasten. Würde er nun plötzlich sehend werden und das Klavier nur vor sich erblicken, ohne es benutzen zu können, so würde er doch niemals aus sich selbst heraus zu der Erkenntnis gelangen, daß dies sein vielgeliebtes Instrument ist. Selbst wenn er die wohlbekannten Töne desselben hört, wird er nicht gleich auf den Gedanken kommen, daß sie von dem gesehenen Gegenstande herrühren, denn sein Orientierungsvermögen nach dem Gesicht ist noch nicht ausgebildet. Führt man ihn zu dem Instrumente, so wird er auf demselben falsch spielen, solange er sich seiner Augen dabei bedient, kurz, es wird sich herausstellen, daß er sich eine ganz andere Vorstellung von der sichtbaren Außenwelt gemacht hat, als es der Wirklichkeit entspricht. Man hat solche Erfahrungen an glücklich operierten Blindgebornen gemacht, die wie ein unbeholfenes Kind noch monatelang bei jedem Schritte stolperten und an Gegenstände stießen, solange sie sich der Augen bedienten, während sie wie früher mit völliger Sicherheit sich in wohlbekannten Räumen bewegten, sobald sie die Augen schlossen. Unser geheilter Blinder bekommt aber doch durchaus keine andere Vorstellung von den Tönen seines Instrumentes und würde es auch sehr bald als das seinige erkennen, wenn er seinen Maßstab zu Hilfe nimmt und nun die durch das Gefühl ermittelten Dimensionen mit den gesehenen vergleicht. Diese letztere Operation entspricht völlig den wissenschaftlichen Methoden der Naturforschung. Die aus den verschiedenen Maßverhältnissen folgenden Gesetzlichkeiten des Naturgeschehens können durch Vervollkommnung unseres Auffassungsvermögens nicht umgestoßen, sondern nur vervollkommnet werden. Das Vergleichen von Verhältnissen, das Messen, wird also immer zu sicherer Erkenntnis führen.

Die verschiedenen Sinne wirken offenbar in sehr verschiedenem Maß an der Erzeugung des allgemeinen Weltbildes mit; aber schon der gebräuchliche Vergleich mit einem Bilde zeigt, daß das Auge den größten Anteil daran hat. Das Auge ist es auch, mit dessen Hilfe die genauesten Messungen angestellt werden können. Es ist wichtig, zu untersuchen, inwieweit die Sinneswerkzeuge zu Instrumenten der Forschung für uns geworden, und welchen Fehlerquellen wir durch ihren Gebrauch ausgesetzt sind.

Von allen sogenannten fünf Sinnen ist das Gefühl wohl der unsicherste. Für das Gefühl gibt es kein besonderes Aufnahmeorgan, es sei denn, man nimmt die ganze Haut dafür, in der die Endnerven für die Übertragung des Gefühlsreizes mit ungleicher Dichtigkeit über die ganze Oberfläche unseres Körpers verteilt sind. Am dichtesten treten diese Nervenenden in den Fingerspitzen zusammen, sehr weit auseinander stehen sie auf dem Rücken, an den Lenden u. s w. Deshalb werden wir die Form und die Größe eines Gegenstandes durch Betasten mit den Fingerspitzen sicherer ermitteln als mit irgend einem anderen Körperteil. Aber die Sicherheit des Tastsinnes ist selbst für die Fingerspitzen ganz wesentlich geringer als z. B. die Sicherheit des Gesichtssinnes, obgleich auch der Blinde Maßvergleichungen anzustellen vermag. Ferner ist der Tastsinn recht groben Täuschungen unterworfen. Man kann sich leicht davon überzeugen, wenn man jemand auf dem Rücken mit einem Nadelkopfe berührt und sich nun die Stelle zeigen läßt, wo die Berührung empfunden wurde. Beide Punkte werden selten zusammenfallen und sehr häufig um mehrere Zentimeter voneinander entfernt sein, oft

sogar wird der angezeigte Punkt auf der entgegengesetzten Seite der Wirbelsäule liegen wie der berührte. Selbst die Fingerspitzen sind unter ungewöhnlichen Verhältnissen den gröbsten Täuschungen ausgesetzt. Man lege den Mittelfinger so über den Zeigefinger, daß die Fingerspitzen aus der gewöhnlichen Ordnung kommen, die Spitze des Mittelfingers also vor dem Zeigefinger, dem Daumen näher als dieser liegt (s. die untenstehende Abbildung). Nun rolle man eine kleine Kugel unter den beiden Fingerspitzen, und man wird den Eindruck haben, als befänden sich zwei Kugeln unter ihnen, die um die normale Entfernung der beiden Fingerspitzen voneinander abstehen. Wenn man den vierten Finger vor den Zeigefinger zu legen vermag, so hat man dieselbe Empfindung, nur daß die bloß gefühlten Kugeln den Abstand dreier Finger voneinander besitzen. Wie überraschend deutlich aber auch diese Täuschung auftritt, so würde man offenbar doch selbst einen Blinden damit nicht auf die Dauer irreführen können. Er würde eben den zahlreicheren Zeugnissen seines Tastsinnes unter normalen Umständen das überwiegende Gewicht beilegen. Immerhin aber bleiben die Gefühlseindrücke doch zu unsicher, als daß sie für die Naturforschung irgend welche Rolle spielten.


Täuschung des Tastsinnes.

Trotzdem kommt uns ein sehr großes und höchst wichtiges Gebiet des Naturgeschehens, die Wärme, direkt nur durch das Gefühl zum Bewußtsein. Wären wir allein auf dieses angewiesen, um die Gesetze der Wärmewirkungen zu erforschen, so würden unsere Kenntnisse von dieser mächtigen Naturkraft höchst unvollkommen geblieben sein. Man denke nur an die Unsicherheit, mit der man durch das Gefühl den normalen Wärmegrad des Badewassers zu bestimmen im stande ist. Füllen wir Wasser von bestimmtem Wärmegrad in zwei Gefäße und tauchen in das eine nur den Finger, in das andere die ganze Hand, so erscheint uns das im letzteren befindliche kälter als das im ersteren. Ferner wird je nach dem Zustand unserer Blutzirkulation uns ein und derselbe Wärmegrad warm oder kalt erscheinen. Außerdem können wir Wärmegrade nur innerhalb sehr geringer Grenzen durch das Gefühl feststellen. Schon bei Temperaturen, die nicht wesentlich über der des Blutes liegen, „verbrennen" wir uns, und dasselbe auf einer Sprengung der Gewebezellen zurückzuführende Gefühl haben wir bei Berührung sehr kalter Körper. Das Gefühl ist zu Wärmemessungen völlig unbrauchbar. Man hat aber gefunden, daß die Einwirkung der Wärme Veränderungen der Ausdehnung von Körpern hervorbringt, und diese letzteren benutzt man z. B. durch Vermittelung der Quecksilberthermometer zur Messung der Temperatur mit dem Auge. Das Messungsgeschäft wird auf das feinere Sinnesorgan übertragen.

Das Gefühl hat uns auch zuerst das Vorhandensein der am häufigsten wirksamen Naturkraft, der Schwere, verraten. Ein Gegenstand, den wir in die Hand nehmen, drückt auf dieselbe, so daß unsere Muskeln eine Gegenkraft anwenden müssen, um die Hand in der gleichen Höhe wie zuvor zu erhalten. Dieser durch die Schwere geübte Druck ist bei kleinen Werten desselben mit verhältnismäßig großer Genauigkeit durch das Gefühl zu bestimmen. Legt man drei

Bogen feines Papier auf die Hand, so wird man es sofort empfinden, wenn einer hinweggenommen wird, obgleich die Gewichtsverminderung nur wenig, ja vielleicht kaum 1 g beträgt. In solchen Fällen kann selbst die Vergleichung des Druckes eines Gegenstandes auf der einen mit dem eines anderen auf der anderen Hand zu einer Art Wägung durch das Gefühl benutzt werden. Ganz unsicher aber werden auch diese Gefühlseindrücke wieder bei größeren Werten. Es tritt hier eine für alle Gebiete der Sinneseindrücke gleichmäßig geltende Regel, das sogenannte Weber-Fechnersche psychophysische Gesetz, in Wirksamkeit, nach welchem der von uns empfundene Eindruck eines Sinnesreizes um so größer wird, je größer sein Verhältnis zu dem bereits vorher wirkenden gleichartigen Sinnenreiz ist. Sein relativer, nicht sein absoluter Wert kommt also für unsere Sinne in Betracht, zum Nachteil unserer wissenschaftlichen Messungen. Bei unseren drei Papierbogen ist das Verhältnis der Schwankung des Sinnenreizes gleich $1/3$; hätten wir dagegen 50 Bogen in der Hand und nehmen einen davon, so werden wir auch nicht die geringste Druckveränderung bemerken; das Verhältnis ist eben nun gleich $1/50$ geworden. Tragen wir bereits einen Zentner auf unseren Schultern, so ist es uns einerlei, ob wir ein Pfund oder eine Feder dazulegen. Gleiches gilt für alle anderen Sinneseindrücke. Ist ein Raum durch zwei Kerzen beleuchtet, so empfinden wir sofort eine Zunahme der Helligkeit, wenn noch eine dritte Kerze hinzutritt, aber nicht, wenn sie zu einer Beleuchtung mit hundert Kerzen gefügt wird.


Geschmackswärzchen (Schmeckbecher) auf der Oberseite der menschlichen Zunge.

Wollen wir also Gewichte innerhalb weiterer Grenzen möglichst genau miteinander vergleichen, so müssen wir von den Gefühlseindrücken völlig absehen, d. h. wieder auf Umwegen die Prüfung durch einen anderen Sinn ermöglichen. Wir erkennen bald, daß das gefühlte Gewicht, der Druck eines Körpers auf seiner Unterlage, die Folge einer Zugkraft ist, die alle Körper dem Erdmittelpunkte näher zu bringen sucht. Diese Zugkraft benutzen wir zur Konstruktion der Wage und sehen nunmehr am Ausschlage der Zunge des Wagebalkens die Gleichheit oder Verschiedenheit zweier zu vergleichenden Gewichte. Wieder muß also der feinere Gesichtssinn für den des Gefühls eintreten.

Nicht wesentlich anders wie mit dem Gefühl ergeht es uns mit dem Geschmacks- und dem Geruchssinn. Beide sind eigentlich nur veränderte, für die flüssigen und gasförmigen Aggregatzustände eingerichtete Gefühlseindrücke. Die Zunge und der Gaumen besitzen sogenannte „Schmeckbecher“, mikroskopisch kleine Gefäße, in welche die zu prüfenden Flüssigkeiten gesogen und dort zweifellos einer chemischen Analyse unterzogen werden (s. die obenstehende Abbildung und Abbildung, S. 35). Diese kann sogar in besonderen Fällen ganz ungemein fein sein, so daß sie die subtilsten Untersuchungsmethoden des Chemikers übertrifft. Ganz besonders bewundernswürdig ist es, wie geringe Mengen dieser physiologisch-chemischen Analyse noch mit Erfolg unterzogen werden können, die in den Retorten der chemischen Laboratorien gänzlich verschwinden würden. Aber solche Analysen können nur an Stoffen vorgenommen werden, die in Wasser, beziehungsweise in der Mundflüssigkeit löslich sind; alle anderen bleiben „geschmacklos“. Auch der Chemiker muß deshalb seine Untersuchungsmethoden soviel als möglich auf den Veränderungen der Stoffe begründen, die durch das Auge zu erkennen sind, also Veränderungen der Farbe, des Volumens, des am Wageausschlag beobachteten Gewichtes, des Aggregatzustandes u. s. w.

In derselben Lage wie bei dem Geschmack sind wir bei dem Geruchssinn. Seine Organe sind ganz ähnlich eingerichtet wie die des ersteren, aber so verfeinert, daß sie bereits auf die äußerst fein verteilten Massenteilchen der Gase reagieren, während der Geschmackssinn der verdichteteren Form der Flüssigkeit bedarf, um wirksam zu werden. In noch weit höherem Maße wie bei dem Geschmack ist es bei dem Geruch erstaunlich, wie verschwindend kleine Mischungsmengen er noch zu unterscheiden vermag. Es ist gar kein Zweifel, daß dieser Sinn der exakten Forschung sehr gute Dienste tun könnte, wenn man ihn bisher mehr geübt und geprüft hätte, und wenn namentlich unsere Sprache besser ausgebildet wäre, um die verschiedenen Geruchseindrücke schärfer und allgemeiner festlegen zu können. In Bezug auf keinen anderen Sinn ist unsere Sprache so arm wie für den des Geruchs. Es ist die Vermutung ausgesprochen, daß unser menschliches Geschlecht in den Tagen seiner Kindheit durch den beständigen Aufenthalt in dumpfen Höhlen viel von der ursprünglichen Schärfe seines Geruchssinnes verloren habe, der ja bekanntlich bei den Tieren noch ungemein viel feiner ausgebildet ist als bei uns, und bei vielen derselben den Gesichtssinn an Sicherheit des Urteils übertrifft. Begegnet ein Hund seinem Herrn, von dem er längere Zeit getrennt war, so wird ihm sein Anblick eine Vermutung geben, daß es sein Herr sei, sicher ist er aber erst, nachdem er ihn berochen hat, und gibt erst dann seiner Freude Ausdruck.



Schmeckbecher der Zunge des Kaninchens. Nach J. Ranke, „Der Mensch“. Vgl. Text, S. 34.

Aus der Armut unserer Sprache auf die relative Unvollkommenheit eines Sinnes zu schließen, wäre indes voreilig. Das Begriffsvermögen vermag nur sehr langsam aus den Tatsachen der Beobachtung einen abstrakten Kern herauszuschälen, und erst wenn wir diesen abstrakten Begriff sehr lange in uns bearbeitet haben, tritt das Bedürfnis hervor, für ihn auch ein Wort zu finden. So zeigen sich die alten Sprachen sogar auch für den Gesichtssinn, für die Unterscheidung der Farben ärmer als die modernen, während doch die pompejanischen Malereien deutlich zeigen, daß die damaligen Künstler alle diejenigen Farben ebenso fein wie die modernen zu unterscheiden wußten, für deren Bezeichnung sie nur einen konkreten Vergleich zu geben im stande waren, wie wir für eine große Anzahl auf das schärfste unterschiedener Gerüche und Geschmackseindrücke.

Wie sehr man aber auch in der Zukunft diese beiden Sinne durch Übung vervollkommnen mag, so werden sie doch niemals die durch das Auge ermöglichten Vergleichsmethoden an Einfachheit und Sicherheit übertreffen. Die bisher betrachteten drei Sinne werden immer nur Beweisgründe untergeordneten Grades den anderweitig ermittelten Forschungsergebnissen hinzufügen können.

Anders verhält es sich mit dem Gehör. Die durch dasselbe unserem Bewußtsein zugeführten Luftschwingungen sind von keinem anderen Sinne und durch keine künstlichen Übertragungen so sicher zu untersuchen als eben durch das Ohr selbst. Die im sogenannten Cortischen Organ des Ohres endigenden Nervenfasern werden zu leicht erzitternden Streifen von glasartiger Beschaffenheit; das Ohr besitzt in ihnen gewissermaßen viele Tausende von Stimmgabeln, von denen jede nur auf einen einzigen Ton abgestimmt ist und nur durch diesem entsprechende Schwingungen mitschwingt, um den das Bewußtsein erregenden Nervenstrom zu

erzeugen. Freilich kann auch das Ohr nur relative Untersuchungen anstellen. Es kann nur vergleichen und z. B. bestimmen, daß zwei schnell nacheinander auftretende Töne die gleichen sind, oder angeben, in welcher Richtung der Skala sie voneinander abweichen. Wie groß diese Abweichung ist, kann durch die eigentümlichen Harmoniebeziehungen der Töne zueinander in manchen Fällen noch ziemlich gut durch das Gehör allein bestimmt werden. Ganz sicher aber ist immer nur die Gleichheit festzustellen, wie überhaupt bei allen Messungen. Will man aber die schwingenden Bewegungen, durch welche diese Töne hervorgebracht werden, nach Größe und Zahl feststellen — und wir wissen ja, daß die Erforschung der Bewegungen der Materie in erster Linie zur Erkenntnis der Naturkräfte nötig ist — so müssen wir diese Schwingungen sichtbar machen, wozu besondere Apparate konstruiert worden sind. Also auch hier wird der wichtigste Teil der Untersuchung dem Gesichtssinn überlassen.



Gehörorgan des Menschen. Nach J. Ranke, „Der Mensch“. Vgl. Text, S. 35.

Das **Auge** übermittelt demnach bei weitem den größten und vornehmsten Teil derjenigen Erfahrungen, die uns eine tiefere Erkenntnis der Natur erschlossen haben. Wir haben uns deshalb mit diesem Organe von vornherein etwas näher vertraut zu machen, noch ehe wir über die Natur des Lichtes Näheres erfahren haben; denn wir müssen schon für unsere allerersten Erfahrungen prüfen können, bis zu welchem Grade wir uns auf die Angaben dieser höchsten uns zu Gebote stehenden Instanz verlassen dürfen.

Jedermann kennt die Einrichtung einer photographischen Camera. Vorn befindet sich eine Glaslinse, die ein Bild eines Teiles der vor ihr vorhandenen beleuchteten Gegenstände auf einer hinter ihr in bestimmter Entfernung aufgestellten Platte entwirft, und zwar ist diese Entfernung eine andere für jede verschiedene Entfernung der Gegenstände von der Linse, vom „**Objektiv**“. Anderseits hängt diese Entfernung für sehr weit abliegende Gegenstände, die „**Brennweite**“, von der Form des Objektivs ab; je mehr dies gewölbt ist, desto kürzer wird die Brennweite. Das Objektiv besteht aus einer Kombination von Linsen verschieden das Licht brechender Glasarten, und in der Mitte zwischen diesen Linsen ist bei den neueren Objektiven eine sogenannte Irisblende angebracht, durch welche die das Licht einlassende Öffnung in ihrer Größe verändert werden kann.

Unser Auge ist im Prinzip dieser photographischen Camera gleich, in manchen Stücken allerdings wesentlich vollkommener, in anderen dagegen zweifellos mangelhafter eingerichtet als diese. Die beiden Erfordernisse, welche das Erkennen von Gegenständen beim Sehen ebensowohl wie das erfolgreiche Photographieren stellt, eine möglichst große Schärfe der Darstellung und für jeden einzelnen Fall die brauchbarste Lichtstärke zu erzielen, widersprechen sich, ja schließen sogar einander in gewissem Sinn aus. Es müssen also Kompromisse geschlossen werden; der

photographische Apparat sucht sie auf anderem Weg als das Auge. Für die Erfordernisse des Lebens hat das Auge den besten Kompromiß gefunden; als optisches Instrument allein ist dagegen die moderne photographische Camera weit vollkommener als das Auge. Die denkbar größte Schärfe einer Abbildung von einem Gegenstande wird offenbar durch eine punktförmige Öffnung erzeugt, so daß immer nur ein einziger Lichtstrahl von jedem Punkte des Gegenstandes bis zu der empfindlichen Platte, beziehungsweise zur Netzhaut gelangen kann. Das untenstehende Bild veranschaulicht dies. Für solche „Lochcamera" gibt es auch keine

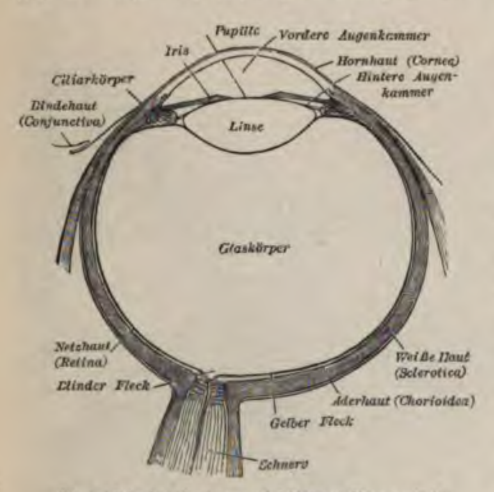


Lochcamera-Aufnahme.

verschiedenen Brennweiten: alle Gegenstände werden in allen Entfernungen in den richtigen perspektivischen Verhältnissen abgebildet. Die Lochcamera wäre also der vollkommenste photographische Apparat und das vollkommenste Auge, wenn sie nicht, wegen der theoretischen Forderung der unmeßbar kleinen Öffnung, nur unmeßbar kleine Mengen Licht zur Wirkung kommen ließe. Um mit einer Lochcamera überhaupt noch photographisch arbeiten zu können, muß man der Öffnung einen gewissen Durchmesser geben. Es können dann von einem und demselben Punkt eines Gegenstandes mehrere nicht parallele Strahlen auf die Bildfläche gelangen. Jeder Punkt bildet sich also als Scheibe ab, welche in der für den nächsten Punkt entstehenden Scheibe teilweise verschwimmt: der Gegenstand wird nur noch unscharf dargestellt. So ist z. B. obige Landschaft ohne Objektiv nur durch ein Loch von $1/4$ mm Durchmesser aufgenommen worden; es war dazu eine Expositionszeit von 2 Minuten nötig, während mit

einem der modernen Objektive der zehntausendste Teil dieser Zeit völlig genügt hätte, um die Landschaft auf der Platte zu fixieren. Die Aufnahme wurde aus einem Zimmer gemacht. Man sieht einen Teil des ganz nahe am Apparat befindlichen Fensterrahmens mit demselben Grade von Schärfe abgebildet wie die fernen Berge. Keine Verzeichnung ist zu bemerken: alle Gegenstände mit geraden Linien sind sowohl am Rande wie in der Mitte des Bildes auch als gerade Linien wiedergegeben. Nimmt man die geringe, hier sogar in gewissem Grade malerisch wirkende Unschärfe des gesamten Bildes aus, so ist es unstreitig vollkommener, als es mit dem besten Objektiv hergestellt werden könnte.

Um von diesem Vorteil kleiner Öffnungen möglichst viel auszunutzen, hat man in den photographischen Objektiven die Blenden eingeführt, während dem Auge die Regenbogenhaut gegeben ist, die sich für jede Helligkeit des beobachteten Gegenstandes verschieden weit öffnet.



Durchschnitt des menschlichen Augapfels.

Die Optik lehrt nun, wie wir später noch eingehender erfahren werden, daß jeder Lichtstrahl an der Grenze zwischen zwei verschieden dichten durchsichtigen Körpern von seinem geraden Weg abgelenkt, gebrochen wird. Diese Eigenschaft wird von den Objektiven und vom Auge benutzt, um Strahlen, die von einem und demselben Punkt eines Gegenstandes ausgehen und die Objektivöffnung an verschiedenen Stellen passieren, doch wieder an einer und derselben Stelle der Platte, beziehungsweise der Netzhaut zusammenzuführen, was ohne jene Brechung, wie wir oben sahen, nicht stattfinden würde. Es wird auf diese Weise größere Lichtstärke erzielt, weil von jedem Punkte des Objektes zugleich mehrere Lichtstrahlen zur Wirkung gelangen, und zwar um so mehr, je größer die sammelnde Linse ist, und doch wird die Unschärfe vermieden, weil die Strahlen wieder in demselben Punkte zusammenkommen. Leider ist nun aber diese letztere Bedingung praktisch nicht ganz exakt zu erfüllen. Zunächst zeigt es sich, daß Strahlen, die von einem Gegenstand aus bestimmter Entfernung ausgehen, auch nur in ganz bestimmter Entfernung hinter der Linse wieder zusammentreffen: die Linsen haben, wie schon oben angeführt, eine Brennweite. Um also einen Gegenstand scharf abzubilden, muß man den optischen Apparat auf die betreffende Entfernung einstellen. Bei der Camera ist die Krümmung des Objektivs gegeben, man muß also die Entfernung der Platte von der Linse verändern. Das Auge dagegen hilft sich auf ganz andere Weise. Es besteht wie die modernen Objektive aus verschiedenen Systemen brechender Flächen und Substanzen. Die erste Fläche wird durch die stark gewölbte Hornhaut gebildet (s. die obenstehende Abbildung). Hinter derselben liegt die mit einer lichtbrechenden Flüssigkeit gefüllte vordere Augenkammer. Nun folgt, wie in den photographischen Objektiven die „Blende", die Regenbogenhaut, und unmittelbar hinter dieser liegt die Kristalllinse, welche stärker lichtbrechend ist als das vordere optische System, die Hornhaut mit der vorderen Augenkammer. Der übrige Teil der Augenhöhle ist wieder mit einer glasartigen Masse erfüllt, die aber wie alle anderen Teile des Auges nicht fest ist. Das ganze Auge wird von einer Knochenhöhle umgeben. Die hintere gewölbte Fläche derselben,

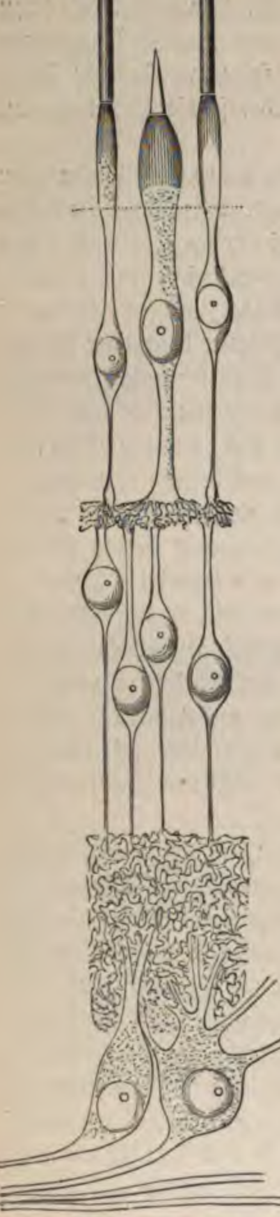
auf der sich das Bild projiziert, kann ebensowenig gegen das optische System verschoben werden wie dieses gegen jene. Die Einstellung wird deshalb nur durch Veränderung der brechenden Flächen der Kristalllinse besorgt, da die das Auge nach außen abschließende Hornhaut als Schutzdeckel möglichst fest, in ihrer Form unveränderlich, bleiben muß. Die Kristalllinse ist zu diesem Zweck zu einem elastischen Körper geworden, der mit Hilfe eines Muskels langgezogen und dadurch abgeflacht werden kann, sich aber sofort wieder auf seine ursprüngliche Form zurückzieht, wenn der Zug des Muskels aufhört. Durch diesen wird also die Einstellung auf einen Gegenstand in bestimmter Entfernung hervorgebracht.

Abgesehen von diesem Übelstande der wechselnden Brennweite besitzen die Linsen aber noch weit schwieriger zu beseitigende Nachteile gegen die „Lochcamera". Wir können im besonderen hierauf erst im Kapitel über das Licht zurückkommen. Hier sei nur angedeutet, daß eine vollkommen scharfe Durchzeichnung eines Bildes, das einen größeren Sehwinkel umfaßt, theoretisch überhaupt undurchführbar ist und mit einer für photographische Zwecke annehmbaren Annäherung nur durch sehr komplizierte Zusammenstellungen verschieden brechender Flächen und Substanzen erreicht werden kann. Geringste Abweichungen der Flächen von der theoretisch notwendigen Form erzeugen Unschärfen, die sich entweder über das ganze Bild verbreiten, oder, wenn die Abweichungen zur optischen Mittelachse symmetrisch sind, von der Mitte nach dem Rande hin zunehmen. Man wird es ohne weiteres begreifen, daß bei den oben beschriebenen mechanischen Vorrichtungen des Auges, die der Kristalllinse ihre wechselnden Krümmungen geben, keine mathematisch vollkommenen Formen derselben erzeugt werden können. Das Auge verzichtet also auf eine allgemeine Schärfe des Bildes und begnügt sich nur mit einer verhältnismäßig recht kleinen Fläche in der Umgebung der Mittelachse, wo das Bild scharf ausgezeichnet wird. Selbst die minderwertigsten photographischen Objektive zeichnen eine verhältnismäßig größere Fläche scharf aus wie das Auge. Es tauscht aber für diesen Nachteil den wesentlichen Vorzug eines sehr großen Sehwinkels ein, der eben nur auf Kosten der Schärfe erreicht werden kann. Die beiden Augen zusammen nehmen noch Lichtstrahlen auf, die einen Winkel von mehr als 180 Grad zwischen sich haben, was bei weitem nicht von einem Objektiv irgend welcher Konstruktion erreicht wird.

Für die Zwecke, welche das Auge als Sinnesorgan zu verfolgen hat, konnte kein besserer Kompromiß zwischen Nachteilen und Vorteilen gegenüber der mathematischen Vollkommenheit eines optischen Systems gefunden werden. Es ist viel wichtiger, aus einem möglichst großen Umkreis optische Mitteilungen, wenn auch noch so unbestimmter Natur, von interessanten oder gefahrdrohenden Ereignissen zu erhalten, die wir dann sofort in die scharfsehende Mittelfläche des Auges zu näherer Untersuchung bringen können, als ein überall nahezu scharf gezeichnetes, kleineres Feld zu überblicken, das in Wirklichkeit alle Gegenstände falsch gezeichnet enthalten müßte. Da alle Fehler eines optischen Systems in seiner Mittelachse immer am kleinsten sind, wir aber durch diese Unschärfe des Auges außerhalb der Mittelachse unwiderstehlich gezwungen werden, alle genau anzusehenden Gegenstände in diese zu bringen, so ist unsere Untersuchung durch das Auge gerade wegen seiner Unvollkommenheit weit geringeren Fehlern unterworfen, als wenn die optischen Fehler desselben besser ausgeglichen wären.

Diesen optischen Einrichtungen des Auges entsprechend zeigt sich die Netzhaut desselben entwickelt, in der die Nervenfasern endigen, die den optisch ausgelösten Reiz zu den Zentren des Bewußtseins weiterleiten. Diese Nervenfasern endigen in eigentümlichen äußerst feinen Zapfen und Stäben, so wie es in der Figur auf S. 40 abgebildet ist. In der Umgebung der

optischen Achse drängen sich diese Nervenendorgane besonders dicht zusammen. Hier befindet sich eine kleine Stelle, die auch schon äußerlich sich durch ihre besondere Färbung auszeichnet, der „gelbe Fleck", wo nur die die Stäbe an Lichtempfindlichkeit weit übertreffenden Zapfen vorkommen. Auf diesen gelben Fleck, der nur etwa 0,3 mm im Durchmesser hat und kaum 1° Sehwinkel umfaßt, bringt das Auge das Bild eines Gegenstandes, den man zu fixieren, näher zu betrachten wünscht. Obgleich diese Elemente der Nervenendigungen ungemein dicht zu Hunderttausenden zusammenstehen, bleiben sie doch getrennt voneinander. Also auch das Bild, welches unsere Netzhaut dem Bewußtsein übermittelt, besteht aus getrennten Eindrücken, ist gekörnt wie das der photographischen Platte, wenn auch ungemein viel feiner. Immerhin aber bleibt doch das Bild der Welt für uns ein Mosaik, kein völlig ineinanderfließendes Ganze. Wenn die Lehren der Atomistiker der Wirklichkeit entsprechen, so ist dieses Mosaikbild wiederum die richtigere Annäherung an die Wahrheit, als das scheinbar zusammenhängende Bild, welches wir zu sehen meinen.



Die Netzhautschichten des Auges. Nach J. Ranke, „Der Mensch". Vgl. Text, S. 39.

Diese Einrichtung des gelben Fleckes nun in Verbindung mit der optischen Unvollkommenheit des Auges ist es, welche uns in den Stand setzt, so ungemein zuverlässige Messungen anzustellen, wie wir sie im folgenden zur tieferen Erkenntnis der Natur überall zu benutzen haben werden. Diese Einrichtung zwingt uns nämlich, immer ein und dieselben Elemente unseres Nervenapparats zu Vergleichungen der verschiedensten Art zu benutzen, so daß aus diesen Vergleichungen die Fehler des Nervenapparates selbst als Differenzen von gleicher Größe herausfallen müssen. Wollen wir z. B. zwei Maßstäbe miteinander vergleichen, so legen wir sie ganz nahe aneinander und bringen einen Teilstrich des einen mit einem des anderen zur Koinzidenz. Das bedeutet aber nichts anderes, als daß wir uns durch unser Nervensystem davon überzeugen, daß bei langsamer Verschiebung unserer Augenachse längs der beiden Striche immer nur ein und dieselben Elemente der Netzhaut im gelben Fleck Lichteindrücke empfangen. Durch solche Vergleiche anderer Teilstriche, die mit Hilfe ähnlicher Koinzidenzbeobachtungen auf den Maßstäben angebracht worden sind, bestimmt man weiter, um wieviel Maßeinheiten der eine Maßstab kleiner ist als der andere. Die ganze Operation des Messens besteht also durchaus nur in der Zählung der Wiederholungen ein und desselben Nervenreizes auf ein und derselben Stelle der Netzhaut.

Sobald man von dieser prinzipiellen Anforderung genauen Messens abgeht, entstehen subjektive Fehler und Augentäuschungen aller Art, ja, das Auge wird dann zu einem unsichereren Untersuchungswerkzeug für die Naturerscheinungen als beinahe alle

übrigen Sinne. Am auffälligsten tritt dieses bei den Täuschungen des sogenannten Augenmaßes hervor. Sehr bekannt ist die Täuschung bei dem untenstehenden sogenannten Zöllnerschen Paradoxon (Fig. a). Die Linien sind in Wirklichkeit parallel, während sie nach derjenigen Seite zu konvergieren scheinen, nach welcher die Querlinien divergieren. Hier stehen zwei Sinnesurteile einander widersprechend gegenüber. Weshalb wir unbedingt dem durch Koinzidenz erhaltenen den Vorzug geben, haben die vorangegangenen Betrachtungen gezeigt. Zwei andere Augentäuschungen sind in Fig. b und c abgebildet. Bei den Kreisabschnitten wird man den unteren für entschieden größer halten als den oberen, während sie beide genau gleich groß sind. Der geteilte Winkel (Fig. c) scheint größer als der ungeteilte. Die Täuschung entsteht dadurch, daß man, so wie die Zeichnungen entworfen sind, die gleichen Dinge nicht unmittelbar im Auge zur Deckung bringen kann. Man muß deshalb bei der Bildung des Urteils zu Gedankenverbindungen, psychologischen Prozessen, seine Zuflucht nehmen, die einseitigen Fehlerquellen unterworfen sind.

Die Astronomen müssen in gewissen Fällen Messungsmethoden anwenden, wie bei Doppelsterndistanzen und Durchmesserbestimmungen von Planeten mit dem Fadenmikrometer, bei denen



Optische Täuschung.

zunächst das eine Objekt, sagen wir also der eine Stern, mit einem Faden zur Deckung gebracht werden muß und dann der andere Stern mit einem anderen Faden, während man gleichzeitig darauf zu achten hat, daß die erste Deckung während der zweiten auch noch besteht. Letztere ist dabei außerhalb des Gebietes deutlichen Sehens. Dadurch treten nachweisbare systematische Fehler auf, die in Beziehung zur Lage des beobachtenden Auges zu der der Fäden stehen. Der Fehler verschwindet beim sogenannten Heliometer, das die beiden Sterne unter sich zur Deckung bringt.

Wegen dieser unbedingten, offenbaren Sicherheit der Koinzidenzbeobachtungen sucht man überall die Wirkungen der Naturkräfte so umzuwandeln, daß man sie durch Koinzidenzmessungen untersuchen kann. Aus diesem Grunde wurde die Wage, das Thermometer und eine große Menge anderer Instrumente erfunden, von denen wir im folgenden noch Kenntnis erhalten werden. Auf einer in Bezug auf die Funktionen des Nervensystems ganz gleichartigen Beobachtungsform beruht die Erkennung der gleichen Höhe zweier Töne, die, wie wir erfuhren, mit einer ähnlichen Sicherheit zu ermitteln ist, wie die sichtbaren Koinzidenzen. Auch die Bestimmung gleicher Helligkeiten durch das Photometer beruht auf demselben Prinzip, indem hier eine Fläche in getrennten Teilen von zwei verschiedenen Lichtquellen beleuchtet wird, von denen man die eine so lange abschwächt, bis die Fläche überall gleich hell erscheint. Man stellt dabei fest, daß die gleichen Sehnervenendigungen von allen Punkten der Fläche nacheinander einen gleich starken Reiz empfangen. Wären verschiedene Gebiete der Netzhaut bei dieser Feststellung beteiligt, so könnte man der Gleichheit der Lichteindrücke offenbar nicht mehr sicher sein, auch wenn sie gleich erscheinen.

Die bisher angestellten Betrachtungen bezogen sich nur auf die Eindrücke von größerer oder geringerer *Helligkeit* eines Gegenstandes. Zu diesen treten aber noch die der *Farbe*, welche einen sehr wesentlichen Anteil an der Mannigfaltigkeit des Naturbildes haben und gleichzeitig auch ein sehr wichtiges Mittel zur Erforschung der Natur geworden sind. Wie indes der Eindruck der Farbe in unserem Auge physiologisch entsteht, ist trotz eifrigster Untersuchungen darüber noch unaufgeklärt. Wir wissen nicht einmal bestimmt, ob die Lichtempfindung selbst sowohl wie die der Farben durch Vermittelung eines chemischen Prozesses, wie bei der Photographie, oder ob sie nur durch den mechanischen Reiz der Wellenbewegungen des Äthers ausgelöst wird. Ein noch recht geheimnisvoller chemischer Prozeß spielt jedenfalls eine wichtige Rolle hierbei, deren Wesen noch unbekannt geblieben ist. Die Netzhaut wird fortwährend von einer roten Flüssigkeit, dem „*Sehpurpur*", überrieselt, der sich im Lichte sehr schnell entfärbt, so daß man seiner im ursprünglichen Zustande nicht habhaft werden kann. Hat man längere Zeit hindurch die Augen geschlossen gehalten, so sammelt sich besonders viel dieses Stoffes an, und das Auge zeigt sich dann noch mehr empfindlich. Man kann sich den Vorgang vielleicht so vorstellen, daß der vom Lichte zersetzte Sehpurpur dieses leichter durchläßt und dadurch den Lichtreiz an diesen Stellen der Netzhaut erhöht. Der Sehpurpur würde dann also gewissermaßen mit den Verstärkungsmitteln der Photographen zu vergleichen sein. Mit der Entstehung der verschiedenen Farbenreize scheint er indes nichts zu tun zu haben. Daß diese letzteren durch einen chemischen Prozeß hervorgebracht würden, läßt sich theoretisch kaum vorstellen, und auch die bisher angestellten physiologischen Untersuchungen sprechen dagegen. Es ist vielmehr wahrscheinlich, daß im Auge ein ganz ähnlicher Mischprozeß vorgeht, wie er künstlich bei dem sogenannten Dreifarbendruck angewendet wird, von dem wir in der beigehefteten Tafel eine Probe geben. Nur drei Farben, Rot, Gelb und Blau, geben, in richtigen Verhältnissen gemischt, alle die feinen Farbenabstufungen wieder, welche die abgebildeten Falter besitzen. Aus dieser praktischen Möglichkeit allein indes zu schließen, daß das farbige Bild im Auge auf ähnliche Weise unserem Bewußtsein zugeführt wird, wäre doch voreilig, und die Untersuchungen haben in dieser Hinsicht noch kein unzweifelhaftes Resultat ergeben. Auffällig ist indes, daß es nur Rot-, Grün- und Blau-, respektive Violettblinde gibt, also z. B. keine Gelbblinden. Dem Grünblinden erscheint das Laubwerk einer sommerlichen Landschaft, wie es sich auf einer gewöhnlichen Photographie darstellt, also nur mit seinen helleren und dunkleren Lichtabstufungen. Sobald sich aber das Laub herbstlich zu färben beginnt, wird es auch für ihn immer farbiger. Das Bild der Natur, wie es der Grünblinde sieht, entspricht etwa dem in unserer Tafel gegebenen, das nur aus zwei Farben des Dreifarbendrucks hergestellt wurde. Bestände nun die Netzhaut des Auges aus drei Schichten von Sehzapfen, von denen jede nur für eine der drei Grundfarben gewissermaßen abgestimmt ist, so würde das Gemisch der verschieden starken Reize der drei Schichten die verschiedenen Farbenabstufungen wohl zum Bewußtsein bringen können, und es würden auch die Erscheinungen der Farbenblindheit durch die Erkrankung einer dieser Schichten zu erklären sein. Aber die Untersuchungen sind, wie gesagt, hierüber noch längst nicht abgeschlossen.

Wären wir für unsere Betrachtungen über die Naturkräfte nur auf den Farbenunterscheidungssinn des Auges angewiesen, so würden viele der interessantesten Resultate der Forschung nicht zu Tage gefördert worden sein, wie ungemein geringe Farbentöne auch das Auge noch wahrzunehmen vermag. Erst durch die Erfindung des *Spektroskops* sind wir in die Lage gesetzt, in den meisten und wichtigsten Fällen auch für die Farbenunterscheidung die Methode


Gelbe Farbenplatte.


Rote Farbenplatte.


Gelbe und rote Farbenplatte zusammengedruckt.


Blaue Farbenplatte.


Die drei Farbenplatten zusammengedruckt.

Dreifarbendruck.



der Koinzidenzen anzuwenden, indem wir die Linien des Spektrums verschiedener Lichtquellen ihrer Lage nach miteinander messend vergleichen. Auf diese Art sind wohl die wunderbarsten von allen Ergebnissen der modernen Naturforschung, namentlich in Bezug auf die Kunde von der Beschaffenheit und die für uns gänzlich unsichtbaren Bewegungen von Welten außerhalb der unsrigen, erhalten worden. Wir kommen hierauf in unserem optischen Kapitel zurück, soweit nicht bereits des Verfassers Werk „Das Weltgebäude“ die Ergebnisse der himmlischen Spektralanalyse behandelt hat.

Die Licht- und Farbeneindrücke finden im Auge nicht momentan statt und hören auch nicht sofort mit dem physischen Reiz auf. Jedermann hat über solche „Nachbilder“ schon Erfahrungen gesammelt. Ein leuchtender Gegenstand, an einem Faden im Kreise herumgeschwungen, erzeugt in unserem Auge einen Kreis vom Halbmesser des Fadens, weil der Eindruck des bewegten leuchtenden Punktes an der einen Stelle der Netzhaut noch nicht aufgehört hat, einen Reiz zu üben, während das Licht schon die folgenden Punkte des Kreises zu reizen begonnen hat. Für das praktische Leben ist diese Eigenschaft des Auges von großem Werte, da wir bei sehr schnell vorübergehenden Lichteindrücken sonst nicht genügende Zeit hätten, uns ein Urteil über dieselben zu bilden. Aber sie gibt zugleich auch zu vielen Täuschungen Anlaß, über deren Folgen für unsere Forschung wir uns klar werden müssen. Jeder hat schon die Wahrnehmung gemacht, daß durch die offenen Fenster eines uns auf der Fahrt begegnenden Eisenbahnzuges die Landschaft ununterbrochen fast ebensogut zu sehen ist, als wenn der Zug nicht vor unseren Augen vorbeieilte. Höchstens erscheint die Landschaft etwas dunkler. Gehen also dunkle Körper nur mit genügender Geschwindigkeit an uns vorüber, so wird das Auge von ihrer Existenz überhaupt nichts verraten, trotzdem diese Körper ganz beträchtliche Ausdehnungen haben können. Die Ätheratome, welche uns allseitig mit ungeheuerer Geschwindigkeit umschwirren, brauchten also durchaus nicht von so ungemeiner Kleinheit zu sein, um von uns doch niemals wahrgenommen werden zu können. Anderseits kann man es sich wohl vorstellen, daß Körper, welche wir feste nennen, doch ein recht lockeres molekulares Gewebe besitzen können, wenn die kleinsten Teile desselben nur sehr rasch hin und her pendeln und dadurch den Eindruck einer festen Oberfläche in ähnlicher Weise gewähren, wie die umschwingende Kugel scheinbar zum Kreise wird. Sind die schwingenden Bewegungen der Moleküle kräftig genug, und finden sie in allen Richtungen statt, so kann dadurch der Eindruck einer relativen Undurchdringlichkeit entstehen, trotzdem diese Moleküle im Ruhezustande sehr weite Lücken in jenem Körper lassen würden.

Solchen und ähnlichen Täuschungen durch unsere Sinne werden wir immer ausgesetzt sein. Wir werden sie nur als Täuschungen erkennen durch ihren Widerspruch entweder mit einer größeren Anzahl von Zeugen oder solcher Beweise, deren Sicherheit durch eine große Anzahl von Bestätigungen auf anderen Gebieten genügend geprüft wurde, wie z. B. jene oft genannte Methode der Koinzidenzbeobachtungen. Dennoch werden wir auch heute noch in vereinzelten Fällen Täuschungen unterworfen sein, ohne sie bisher als solche erkannt zu haben.

Anderseits kann uns eine Anzahl von Naturerscheinungen und Wirkungen der Körper aufeinander dadurch entgehen, daß sich Wirkung und Gegenwirkung für unsere Sinne aufheben oder sonst verhüllen. Ein sehr augenfälliges Beispiel dafür, wie sich sehr naheliegende Dinge beharrlich der Erkenntnis entziehen können, läßt sich aus dem Gebiete der Himmelskunde anführen. Der Mond wendet uns bekanntlich immer nur dieselbe Seite zu. Wenn es möglich

wäre, daß auf dem Mond intelligente Wesen existierten, die jedoch durch irgend welche Ursache an die der Erde abgewandte Seite gefesselt wären, so hätten diese deshalb von der in ihrer nächsten Nähe befindlichen großen Erde, die die Hauptbewegungen ihres Wohnsitzes veranlaßt, durchaus keine Kenntnis, während sie alle anderen Himmelskörper genau so wie wir sehen. Erst sehr verwickelte logische Schlüsse würden sie über die Notwendigkeit des Vorhandenseins dieses nächsten aller Weltkörper belehren, während ihre Kenntnis von allen fernsten Welten längst ebensoweit vorgeschritten sein könnte wie bei uns.

Es ist sehr wohl möglich, daß wir in Bezug auf viele Dinge in der Natur in einer ähnlichen Lage sind wie diese gedachten Mondbewohner. So ist, wie schon erwähnt, die allgegenwärtige Elektrizität der Menschheit jahrtausendelang bis auf ganz unsichere Vermutungen unbekannt geblieben. Die Eigenschaft der beiden Elektrizitäten, sich möglichst schnell auszugleichen, wodurch sie dann wirkungslos werden, hat eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Ausgleich der Rotationsbewegung des Mondes mit seiner Umlaufszeit um die Erde, wodurch jene oben geschilderten Eigentümlichkeiten entstehen.

Große Überraschungen stehen nach der Ansicht des Verfassers durch ein ähnliches Verbergen der Wirkungen auf dem Gebiete des Einflusses des Lichtes auf den Eintritt von chemischen Verbindungen bevor. Daß das Licht unter Umständen einen sehr wesentlichen Einfluß auf diejenigen Bewegungen der kleinsten Teile der Materie hat, welche die chemischen Umsetzungen bewirken, ist zur Genüge nachgewiesen. Welche Wunder es hervorbringen kann, zeigt die Entstehung des das Pflanzengrün erzeugenden Chlorophylls und die Aufgabe des Sehpurpurs. Immer mehr und mehr Stoffe werden namentlich im Gebiete der organischen Chemie entdeckt, welche lichtempfindlich sind. Es ist aber offenbar möglich, daß gerade diese scheinbar lichtempfindlichsten Stoffe die am langsamsten vom Lichte zersetzbaren sind, die sich uns bei der Langsamkeit unserer Sinne eben noch als solche verraten, während es eine große Anzahl so lichtempfindlicher Stoffe geben kann, daß sie schon bei der geringsten Berührung mit einer Lichtwelle in diejenigen Bestandteile zerfallen, welche uns allein bekannt werden. Viele Vermutungen sprechen dafür, daß die Rolle des Lichtes für den Aufbau der kleinsten Teile der Materie eine weit größere ist, als man es bisher vermutete. Um diese aber zu erkennen, müßten wir chemische Untersuchungsmethoden erfinden, die ausschließlich im völlig Dunkeln stattfinden. Das Auge, sonst das sicherste Hilfsmittel der Forschung, versagt hier durchaus. Das ganze Gebiet der Chemie müßte nach diesen neu zu erfindenden Methoden neu bearbeitet werden, welche die chemischen Reaktionen nur durch das Gefühl, den Geschmack, den Geruch oder das Gehör zu erkennen gestatten. Würde man dann Reaktionen finden, die im Dunkeln von den bisher bekannten abweichen, so hätte man einen solchen äußerst lichtempfindlichen Stoff entdeckt. Es käme dann noch darauf an, das Umwandelungsprodukt, welches durch die Einwirkung des Lichtes aus ihm entsteht, ähnlich wie bei dem photographischen Prozeß zu fixieren, um die neue Reaktion auch im Lichte zu prüfen. Nur die Anwendung solcher Methoden wird einmal die Photographie von den verhältnismäßig groben Wirkungen der bisher angewendeten Metallsalze befreien und ungeahnte Fortschritte zeitigen können.

Wir beginnen nunmehr die empfangenen Sinneseindrücke zu ordnen und versuchen, ein einheitliches Bild der Natur aus ihnen herzustellen.

Erster Teil.

Die physikalischen Erscheinungen und ihre Gesetze.

1. Die großen Bewegungen im Weltraum.

Bei der Auswahl der Erscheinungen, welche wir zuerst in den Bereich unserer eingehenderen Betrachtungen ziehen wollen, soll ihre Auffälligkeit maßgebend sein. Wir stoßen dabei ohne weiteres auf die Erscheinungen der Schwerkraft, soweit wir uns auf der Erde allein umsehen. Für den denkenden Beobachter werden indes die Erscheinungen am Himmelsfirmamente noch weit eindrucksvoller sein als alle irdischen Ereignisse in seiner näheren Umgebung. Jedenfalls werden wir die dort oben wahrgenommenen Bewegungen auch ohne tieferen Einblick für die größeren und reineren halten, namentlich in Bezug auf die sie leitenden Naturgesetze gegenüber dem Gewirr von störenden Einflüssen, denen die auf der Erde beobachteten Bewegungen unterworfen sind. Da also die Bewegungen der Himmelskörper voraussichtlich die einfacheren sind, so empfiehlt es sich, mit diesen zu beginnen.

Freilich wissen wir bereits, daß die Wissenschaft von den himmlischen Bewegungen sich längst als besonderer Zweig von der eigentlichen Physik losgelöst hat. Wollen wir aber dem Bilde von dem einheitlichen Walten der Naturkräfte, das wir hier zu entwerfen gedenken, seinen notwendigen universellen Charakter aufprägen, so müssen wir uns unbedingt an dieser Stelle einen Überblick dieser Wissenschaft von den himmlischen Bewegungen verschaffen, um dann, aus den Himmelsräumen zur Erde herabsteigend, jene selben Gesetze, die dort oben in erhabener Einfachheit walten, bis in ihre feinsten Wirkungen hinein hier auf der Erde weiter verfolgen zu können.

Wie die Resultate der astronomischen Beobachtung, die wir hier zu Grunde legen werden, erhalten worden sind, kann indes hier nicht weiter erörtert werden. Es muß genügen, anzuführen, daß sie durch die denkbar sichersten Methoden von Koinzidenzbeobachtungen gefunden wurden, welche Sinnestäuschungen ausschließen und die Genauigkeit der Ermittelungen bis zum höchsten Grade menschlicher Fähigkeit steigert.

Diese Forschungen, über deren Einzelheiten man in des Verfassers Werk „Das Weltgebäude" weiteres erfahren kann, haben erwiesen, daß alle Himmelskörper in unaufhörlicher Bewegung begriffen sind. Diese Bewegungen stellen sich teilweise als scheinbare, durch unsere eigene Ortsveränderung im Weltraume hervorgebrachte, teils als wirkliche heraus, die bei der nach ungezählten Millionen sich beziffernden Mehrheit der Himmelskörper sich als gleichförmig schnell und geradlinig erweisen, soweit unsere heutigen Kenntnisse sie zu verfolgen vermögen.

Der bei weitem größte Teil der uns bekannten Materie ist also mit der einfachsten Bewegungsart begabt, die wir uns vorstellen können. Das Bild der Natur ließe sich in unserem Geiste verhältnismäßig einfach wiedergeben, wenn nicht unglücklicherweise gerade diese Himmelskörper sich in unermeßlichen Entfernungen von uns befänden, in denen sich die Abweichungen von der Hauptbewegung verhüllen, die wir in unserem engeren Weltreich überall wahrnehmen. Es ist sehr wohl möglich, ja sogar wahrscheinlich, daß sich jene geradlinigen Bewegungen im Laufe kommender Jahrtausende als uns nur geradlinig erscheinende, verhältnismäßig sehr kleine Stücke kreisender Bewegungen erweisen, die im wesentlichen nicht verschieden sind von den in unserer größeren Nähe wahrgenommenen.

Jene scheinbar geradlinigen Bewegungen finden in dem unermeßlich großen Reiche der Fixsternwelt statt, wo Millionen von Sonnen, der unsrigen ähnlich, den Raum durcheilen, unbekannten Zielen entgegen. Sähen wir nicht an dem geheimnisvollen Ringe der Milchstraße, daß auch diese Schar von Sonnen, von einer gemeinsamen Kraft getrieben, ihre Wege offenbar so einrichten muß, daß sie zu solcher gemeinsamen Ordnung führen, so würden wir glauben dürfen, diese geradlinig und gleichförmig fortschreitende Bewegung entspreche dem Urzustande der Materie überhaupt, da der heutige Stand der Wissenschaft eine Ursache für diese Bewegung nicht zu entdecken vermag, sondern höchstens die noch nicht beobachteten Abweichungen von der geraden Linie der allgemeinen Anziehung des ganzen Milchstraßensystems zuschreiben könnte.

Irgend eine Bewegungsform müssen wir ja unbedingt als von Anfang an vorhanden gewesen annehmen, da wir uns unseren Vorbestimmungen gemäß von allen Betrachtungen über den absoluten Anfang von irgend etwas prinzipiell fernhalten wollen. Es war also von allem unserm Denkvermögen noch zugänglichen Anfang an bereits Materie vorhanden, und diese Materie war in Bewegung, veranlaßt durch Zustände, die vor diesem Anfang stattfanden, also außerhalb unseres Denkvermögens liegen, oder diese geradlinige, gleichförmige Bewegung ist überhaupt ein so lange unveränderlicher Urzustand gewesen, als keine anderen Einwirkungen den Weg der Materie verändern.

Wir können uns überhaupt nicht vorstellen, wie ein Körper, der sich in Bewegung befindet, diese Bewegung aufgeben könne, ohne daß irgend etwas von außen an ihn Herantretendes ihn dazu veranlaßt. Denn jede Wirkung muß ihre Ursache haben, sonst müßten wir jedes Nachdenken über die Vorgänge um uns her überhaupt aufgeben. Dies ist der oberste Grundsatz aller Forschung, aus welchem ohne weiteres der folgende entspringt, daß jede Wirkung ihre gleichgroße Gegenwirkung haben muß. Newton war es, der diesen Satz zuerst in aller Form aufstellte und seine Richtigkeit experimentell nachwies, wenngleich dieser Satz ebenso selbstverständlich ist, als daß man wieder dieselbe Summe erhalten muß, wenn man von einer bestimmten Größe eine andere hinwegnimmt und wieder hinzusetzt, oder daß eine Wage wieder einspielen muß, wenn man in beide Schalen ein gleiches Gewicht legt. Ein einmal vorhandener Bewegungszustand kann deshalb nicht aufhören, bis ihm ein Widerstand von der gleichen Größe entgegentritt, z. B. wenn ihm ein gleich großer, gleich schnell bewegter Körper aus einer genau entgegengesetzten Richtung wie die seiner eigenen Bewegung begegnet, denn alsdann sind offenbar alle Bedingungen gleich, und die Wirkungen müssen sich aufheben.

Aus jenem obersten Prinzip gleicher Wirkungen von gleichen Ursachen folgt deshalb auch mit logischer Selbstverständlichkeit das sogenannte Gesetz der Trägheit, das besagt, daß kein Körper seinen Zustand ändert, solange er nicht durch eine Wirkung dazu gezwungen wird.

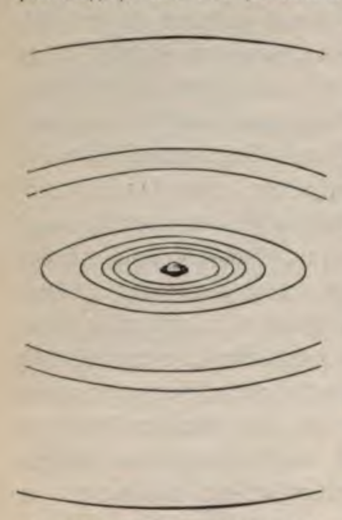
Der Körper hat ebensowenig Veranlassung, seine vorhandene Bewegung ohne äußeren Zwang aufzugeben wie seinen Ruhezustand. Das erstere war in nicht weit zurückliegenden Ansichten über die Natur nicht so selbstverständlich, wie es uns heute erscheint. Man konnte ja in Wirklichkeit eine ununterbrochen fortdauernde Bewegung auf der Erde niemals beobachten: eine abgeschossene Kugel fiel schließlich immer wieder auf die Erde herab, mochte sie auch noch so kräftig ihren Flug begonnen haben; ein Schwungrad mochte in noch so feinen Lagern ausbalanciert sein, es verlangsamte dennoch beständig seine Umdrehungsgeschwindigkeit, bis es endlich stillstand. Der noch nicht genügend geklärten Anschauung kann es sogar als ein Widerspruch mit dem allbekannten Satze, daß es kein sogenanntes Perpetuum mobile geben kann, erscheinen, wenn eine Bewegung in alle Ewigkeit fortbesteht. Man wolle aber wohl bedenken, daß man von dieser Bewegung keinerlei Arbeitsleistung beanspruchen darf, wenn sie fortbestehen soll; das Perpetuum mobile will aber gerade fortwährend Arbeit leisten, ohne daß ihm neue Kraft zugeführt wird, es will Kraft aus sich selbst erzeugen. Nach den Anschauungen über die physikalischen Vorgänge, wie sie vor Galilei herrschten, wäre in der Tat die Konstruktion eines Perpetuum mobile prinzipiell möglich gewesen. Wenn die abgeschossene Kugel nicht ohne allen Anlaß weiterfliegt, bis die Schwerkraft sie zur Ruhe bringt, so muß sie doch aus sich heraus oder doch durch irgend einen anderen verborgenen Anlaß ihre Bewegung immer wieder erneuern, d. h. immer wieder neue Kraft in sich aufnehmen oder für unsere Sinne erzeugen. Es wäre dann aber nicht einzusehen, weshalb die Kugel, nachdem sie für einen Augenblick in ihrem Lauf aufgehalten wurde, ihre Bewegung nicht wieder fortsetzt. Machen wir zur weiteren Erläuterung folgendes Experiment:

An einem Faden ist eine Kugel aufgehängt, die, in die Höhe gehoben und losgelassen, um ihre Ruhelage pendeln kann. Dicht neben ihr ist eine zweite ganz ebenso aufgehängt, daß beide sich berühren. Heben wir beide an ihren Fäden im Kreisbogen gleich hoch und lassen sie los, so werden sie aufeinanderprallen und dann, wenn sie nicht elastisch sind, in Ruhe bleiben. Das werden wir bei jeder Anschauung über das Zustandekommen der Erscheinung ganz natürlich finden, weil gleiche Kräfte gegeneinander wirken, so daß keine von ihnen Veranlassung hat, der anderen etwas nachzugeben. Wohl aber sind die Ursachen dieser Ruhe verschiedene bei den beiden hier einander gegenübergestellten Anschauungen. Entsteht die bewegende Kraft immer neu in den Kugeln, so sind sie nur deswegen in Ruhe, weil sie mit gleicher Kraft, aber in entgegengesetzter Richtung immer weiter gegeneinander drängen. Würde man also die Kugeln so verschieben, daß sie aneinander vorbei können, so müßten sie wieder fortfahren, sich zu bewegen, was nicht geschieht.

Wir unterlassen es, an dieser Stelle auf weitere Beweise des Trägheitsprinzips durch Erfahrungen auf der Erdoberfläche einzugehen, die erst später zu behandeln sind, und wollen vorerst sehen, wie weit die Bewegungen der Himmelskörper dieses hier zunächst nur hypothetisch anzunehmende Prinzip bestätigen. Diejenigen beobachteten Bewegungen von Himmelskörpern, welche nicht in der nachweisbaren Nähe anderer Körper stattfinden, bei denen man also keinen von außen her wirkenden Einfluß von vornherein voraussetzen kann, sind, soviel wir in Erfahrung bringen konnten, geradlinige und gleichmäßig schnelle. Wir müssen also zuerst annehmen, daß diese Bewegungen nur unter dem Einflusse des Trägheitsprinzips geschehen. Wo wir aber zwei oder mehr Körper nebeneinander Bewegungen ausführen sehen, geschieht dies immer in einer derart gebogenen Linie, daß ein Bestreben des einen, meist auch schon äußerlich sofort als größer erscheinenden Körpers, die anderen zu sich hinzuziehen, an sich zu fesseln,

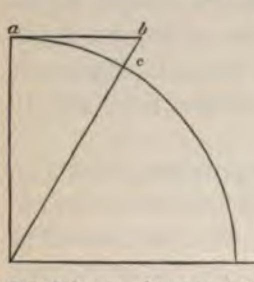
deutlich hervortritt. Die Bahnen jener kleineren Körper sind meist geschlossen, in sich wieder zurückkehrend. Sie bleiben also in durchschnittlich gleicher Nähe zu dem größeren, ihre Bewegung offenbar beeinflussenden Körper.

Zeichnen wir nach den angestellten Beobachtungen die relativen Bewegungen dieser Körper auf, so wie wir sie von unserem Standpunkt aus sehen, so ergeben sich meist Ellipsen. So sind z. B. hierneben die Bahnen der acht Monde des Saturn, die äußersten Raummangels wegen nur teilweise aufgezeichnet, wie wir sie zu gewissen Zeiten sehen. Es ist von vornherein zu vermuten, daß diese besondere Form der Bahnen teilweise durch die Perspektive hervorgerufen wird, in der wir sie sehen, teilweise aber auch durch die physischen Gesetze, welche jene Bewegungen erzeugen, und die wir hier ergründen wollen.



Die Bahnen der Saturnsatelliten.

Jeder kreisförmige Körper, nehmen wir etwa einen Teller, erscheint als Ellipse, wenn wir ihn von der Seite sehen, und zwar ist die Ellipse um so flacher, je geneigter die Sehrichtung zu der Ebene ist, auf welcher sich der Teller befindet. Aber auch ein an sich schon elliptischer Gegenstand, sagen wir eine längliche Schüssel, wird, unter einem Neigungswinkel gesehen, wieder als Ellipse erscheinen. Man wird ohne weiteres verstehen, daß es Methoden gibt, herauszufinden, wieweit eine solche scheinbare Form der bloßen Perspektive, die überall in derselben Richtung gleiche Wirkungen haben muß, oder der wahren Gestalt zuzuschreiben ist. Man hat z. B. von vornherein annehmen dürfen, daß die in gleicher Richtung gestreckt erscheinenden Ellipsen der Satellitenbahnen ein und desselben Planeten in der Hauptsache einer perspektivischen Verkürzung diese elliptische Form verdanken, während die Bahnen in Wirklichkeit nahezu Kreise sind, deren wahre Größenverhältnisse aus jenen Scheinformen deshalb zu berechnen waren. Ebenso wechselt die Gestalt der acht Bahnen mit der Lage der Erde zum Saturn.



Einfluß des Gesetzes der Trägheit und der Anziehungskraft auf die Bewegung von Körpern.

Finden nun jene kreisförmigen Bewegungen der Satelliten um ihre Hauptkörper unter dem Einfluß einer Anziehungskraft dieser letzteren statt, dann muß auch ihre ursprünglich geradlinige Bewegung in jedem Augenblick um eine bestimmte Größe gegen den Planeten hin abgelenkt werden. Wenn der Körper nämlich ohne jene Anziehungskraft in einer gewissen Zeitspanne von a nach b gelaufen ist (s. nebenstehende Figur), so wird er dagegen durch den Planeten in den Kreis zurück nach c geführt, und die Größe $bc = s$ ist deshalb ein Maß für diese Anziehungskraft. Diese Größe läßt sich aber immer für einen Kreis von bestimmten Dimensionen für eine gegebene Zeitspanne berechnen. Rein geometrische Methoden lassen also die Fallgeschwindigkeit g der Himmelskörper gegeneinander ermitteln, und zwar in Metern für die Sekunde, wenn die Umlaufszeit in diesem Zeitmaß und der Bahndurchmesser in Metern bekannt sind. Wir erhalten dafür die einfache Formel $g = \frac{4r\pi^2}{u^2}$ für eine Kreisbahn, wo r der Halbmesser des Kreises, π die bekannte Ludolphsche Verhältniszahl des Halbmessers zum Umfang eines Kreises (3,1416...) und u die Umlaufszeit bedeutet.

Für die Satelliten der Planeten sind nun r und u durch die Beobachtung ohne weiteres zu finden. Man braucht nur zu bestimmen, in welchen Zwischenräumen der betreffende Satellit stets wieder in seine größte Entfernung (Elongation) vom Planeten in derselben Richtung zurückkehrt, und wie groß diese Entfernung z. B. in Teilen des scheinbaren Planetendurchmessers selbst ist. Ist also unser oberstes Gesetz der Trägheit, das wir mangels vorliegenden Beobachtungsmaterials noch nicht beweisen konnten, richtig, so ziehen die Planeten in der Tat ihre Satelliten mit der Kraft g beständig zu sich heran. Wir geben die betreffenden beobachteten Zahlen für die vier älteren Jupitersatelliten hier an:

	u	r	S^2g		u	r	S^2g
I . . .	1,7691	5,933	74,83	III . .	7,1545	15,057	11,61
II . . .	3,5512	9,437	29,56	IV . .	16,6890	26,486	3,75

Um nicht zu große, beziehungsweise zu kleine Zahlen zu erhalten, haben wir die Umlaufszeit nicht in Sekunden, sondern in Tagen hingeschrieben, also einen um $60 \times 60 \times 24 = 86{,}400$ mal zu großen Wert. Durch das Quadrat dieser Zahl muß man die letzte Zahlenreihe unserer Tafel dividieren, um den Weg in Einheiten des Jupiterhalbmessers, in denen r oben ausgedrückt wurde, zu erhalten, um welchen jeder der vier Satelliten in Wirklichkeit in jeder Sekunde von seinem Hauptkörper angezogen wird, oder doch (um uns vorsichtig auszudrücken, ehe etwas bewiesen ist) die Strecke zu finden, um welche er aus irgend einem Grunde gegen den Hauptkörper hineilt, weil er anders in der unzweifelhaft beobachteten Kreisbahn nicht verharren könnte.

Geht nun vom Jupiter eine Kraft aus, welche die Bewegungen aller vier Monde reguliert, so werden die vier Zahlen für g notwendig auch etwas Gemeinschaftliches haben, das wir, um das Wesen jener Kraft zu ergründen, zu erforschen suchen müssen. Zunächst sehen wir, daß g mit der Entfernung stark abnimmt. Das wundert uns nicht, denn die alltägliche Erfahrung zeigt, daß jede Wirkung mit dem Abstande von ihrer Ursache abnimmt. Wir sehen ein Licht, hören einen Ton um so schwächer, je weiter wir von seiner Quelle entfernt sind. Diese Wahrnehmung an den Jupitersatelliten spricht also bereits für unsere Vermutung einer zentralen Kraft im Jupiter. Es kommt uns aber darauf an, ein genaues Maß für dieselbe zu finden. Wir müssen dazu Hypothesen aufstellen, Versuche machen. Nehmen wir einmal an, die Kraft nähme im selben Verhältnis wie der Abstand vom Mittelpunkt ab. Unterscheiden wir die betreffenden Werte für die ersten zwei Satelliten durch das Zeichen $_1$, so müßte unter dieser Voraussetzung $gr = g_1 r_1$ oder $\frac{g}{g_1} = \frac{r_1}{r}$ sein. Es findet sich nun aber $\frac{g}{g_1} = 2{,}532$, während $\frac{r_1}{r} = 1{,}591$ ist. Diese Voraussetzung stimmt also mit der Beobachtung nicht überein, auch nicht, wenn wir dieselbe Rechnung für die anderen Satelliten ausführen. Wir suchen deshalb nach anderen Verhältnissen. Da fällt es uns auf, daß 1,591 mit sich selbst multipliziert gerade 2,532 gibt, die beiden oben gefundenen Werte also im quadratischen Verhältnis zueinander stehen. Ist dies nicht ein bloßer Zufall, so wäre also auch für alle übrigen Satelliten $\frac{g}{g_1} = \frac{r_1^2}{r^2}$, oder der Wert gr^2 eine Konstante für alle vier Bahnen, was sich in der Tat auf das genaueste bestätigt; wir erhalten dafür abgerundet die Zahl 2638, welche der vier Zahlenreihen unserer Tabelle wir auch verwenden. Es folgt daraus, daß *die Anziehungskraft des Jupiter auf seine Monde mit dem Quadrat ihrer Entfernung von ihm abnimmt.*

Setzen wir in die Formel $\frac{g}{g_1} = \frac{r_1^2}{r^2}$ die Werte für g und g_1 ein, wie sie aus der Formel auf S. 48 folgen, indem wir u_1 die Umlaufszeit des anderen Satelliten nennen, so fällt aus dem entstehenden Bruch oben und unten der konstante Koeffizient $4\pi^2$ heraus, und wir erhalten $\frac{g}{g_1} = \frac{r_1^2}{r^2} = \frac{r u_1^2}{r_1 u^2}$ oder $\frac{r_1^3}{r^3} = \frac{u_1^2}{u^2}$, d. h.: *die Quadrate der Umlaufszeiten verhalten sich*

70,530 km mißt. Wollen wir also die Anziehungskraft des Jupiter in Einheiten jenes Kon-[illegible]meters ausdrücken, so haben wir zunächst die Werte von r in unserer Tabelle auf 5,49 mit 70,530,000 zu multiplizieren und dann den Wert von g mit Hilfe der weiter oben gegebenen Formeln zu berechnen. Dies ergibt dann die gesuchte Anziehungskraft in der Entfernung des betreffenden Satelliten.

Es wird aber gut sein, um die Kräfte der verschiedenen Himmelskörper miteinander zu vergleichen, sie alle auf die Wirkung aus ein und derselben Entfernung zu beziehen. Wir wählen dafür die Größe des oben angegebenen Erdhalbmessers und nennen diese R = 6,377,400 m. Setzen wir nun auch r in Einheiten des Erdhalbmessers an, behalten aber für u die Einheit des Tages bei und nennen die Anzahl der Sekunden des Tages S = 86,400, so ist nach dem Vorangegangenen $g = \frac{4\pi^2 R r^3}{S^2 u^2}$; oder, indem wir den konstanten Faktor $f = \frac{4\pi^2 R}{S^2} =$ 0,03372 einführen: $g = f\frac{r^3}{u^2}$, wobei dann g unmittelbar in Metern für die Sekunde erhalten wird. Für Jupiter ergibt diese Formel, indem man seinen ersten Satelliten ($r = 5{,}933 \times 11{.}06$) wählt, g = 3047 m. Wählen wir einen Satelliten des Saturn aus, z. B. Titan, dessen Entfernung vom Saturnmittelpunkte gleich 190,2 Erdhalbmessern ist, während er sich in 15,945 Tagen um jenen Planeten bewegt, so erhalten wir g = 91,23 m, also wesentlich weniger. Die anziehende Kraft des Saturn ist im Verhältnis von 3047 zu 91,23 geringer als die des Jupiter. Wir kennen sowohl die Umlaufszeit wie die Entfernung der Erde von der Sonne, vermögen also auch sofort die Kraft der Sonne zu berechnen. Aus der oben angeführten Sonnenparallaxe folgt, daß die Sonne 2331 Erdhalbmesser von uns entfernt ist. Die Umlaufszeit der Erde ist aber gleich einem Jahre, oder 365,26 Tagen. Mit diesen beiden Zahlen erhält man g = 3,201,000 m. Die Kraft der Sonne ist also eine ganz ungeheuer große, selbst verglichen mit der des Jupiter. Da nun ebenfalls die Erde von einem Mond umkreist wird, können wir auch deren Kraft finden. Der Mond steht 60,275 Erdhalbmesser von uns entfernt und bewegt sich in 27,32 Tagen um unseren Planeten. Das ergibt 9,89 m für die Kraft, mit welcher die Erde den Mond regiert.

Die Sonne zieht nun nicht nur die Erde, sondern auch alle Körper in ihrer Sphäre mit einer Kraft an, die sich durch g = 3,201,000 m bemißt, wie es in der Tat alle Beobachtungen bestätigen, anderseits aber auch die Erde nicht nur den Mond, sondern alle Körper, also auch die Sonne mit der Kraft g = 9,89 m. Infolgedessen kann die Wirkung der Sonne auf die Erde nur gleich der Differenz dieser beiden Zahlen sein. Wir können aber diesen Abzug hier vernachlässigen, weil wir ja ohnehin bei der Zahl für die Sonne nur einen bis auf 1000 m angenäherten Wert angegeben haben. Dagegen hat die Beobachtung gezeigt, daß das entsprechende Verhältnis zwischen Erde und Mond ein bei weitem nicht so ungleiches ist. Die Beobachtungen ergeben, daß die Anziehungskraft des Mondes auf den Mittelpunkt der Erde sich durch g = 0,121 m ausdrückt. Diesen Wert müssen wir also von dem für die Erde allein gefundenen abziehen, um diejenige Kraft zu finden, die wir durch Beobachtungen in unserer nächsten Umgebung wiederzuentdecken hoffen. Es folgt also das für die Mondanziehung korrigierte g = 9,77 m.

Wir sind damit von den Himmelsräumen zur Erde herabgestiegen und kennen eine Eigenschaft der letzteren, deren notwendigen Wirkungen wir auf ihrer Oberfläche nachspüren können.

Weitergehende analytische Untersuchungen beweisen, daß die elliptischen, allgemeiner die Kegelschnittbewegungen, welche die Himmelskörper umeinander beschreiben, eine strenge Folge der physikalischen Voraussetzungen sind, die wir deswegen gemacht haben. Wir können aus diesem Grunde die Ergebnisse dieser Untersuchungen in folgenden Sätzen zusammenstellen:

wie die **Kuben der Entfernungen vom anziehenden Körper.** Dies ist eines der drei berühmten Gesetze der himmlischen Bewegungen, die bereits Kepler (s. die untenstehende Abbildung), der große Reformator der theoretischen Himmelskunde, gefunden hat, und die für alle Weltkörper, die daraufhin untersucht werden konnten, volle Bestätigung finden. Also nicht nur jene vier Zahlenwerte unserer Tabelle auf S. 49, von denen wir ausgingen, sondern Hunderttausende von Wahrnehmungen am Himmel beweisen uns, daß die beiden Voraussetzungen, auf denen alle unsere bisherigen Schlußfolgerungen beruhten, richtige sind: erstens behalten die Körper ihre vorhandene geradlinige und gleichmäßige Bewegung stets unverändert bei, solange sie nicht durch eine äußere Einwirkung von diesem Weg abgelenkt werden (Gesetz der Trägheit), und zweitens üben zwei Körper eine Anziehungskraft aufeinander aus, die mit dem Quadrat der Entfernung beider voneinander abnimmt.



Johannes Kepler. Nach einem Stiche von J. von Heyden.

Wir haben unsere forschenden Blicke zuerst zum Himmel gewendet, da wir vermuteten, daß die Gesetze der Natur, die wir in den folgenden Kapiteln dieses Werkes auf der Erde weiter verfolgen wollen, im Weltenraume reiner und deshalb klarer vor Augen treten müßten. Im Hinblick hierauf ist es für uns wichtig, die Größe der an den Himmelskörpern beobachteten Kräfte in irgend einem uns verständlichen irdischen Maße zu ermitteln, um die Ergebnisse unserer Beobachtungen an irdischen Objekten damit vergleichen zu können. Die konstante Zahl 2633, welche wir als ein Maß der Anziehungskraft des Jupiter fanden, ist in Einheiten des Jupiterhalbmessers ausgedrückt. Astronomische Beobachtungen, die auf keinen anderen Voraussetzungen als der Sicherheit direkter Koinzidenzmessungen beruhen, ermöglichen es nun, den wahren Durchmesser des Jupiter oder irgend eines anderen Planeten in Teilen eines beliebigen, in unseren Händen befindlichen Maßstabes, z. B. eines Meters, zu finden. Geometrische Methoden beweisen uns zunächst, daß der Halbmesser unserer Erde, aus der mittleren Entfernung der Sonne von uns gesehen, unter einem Winkel von 8,85″ erscheinen würde (**Sonnenparallaxe**). Den Halbmesser der Sonne aber ergibt unsere direkte Messung aus der gleichen Entfernung 108,7 mal größer. Also muß auch ihr wirklicher Halbmesser im selben Verhältnis größer sein. Die Ausmessung der Erde hat nun ergeben, daß in ihrem Halbmesser 6,377,400 mal die Länge desjenigen Maßstabes enthalten ist, der in Paris als sogenannter Konventionsmeter aufbewahrt wird. Der Halbmesser der Sonne beträgt also $6{,}377{,}4 \times 108{,}7 = 693{,}140$ km. Ebenso findet sich, daß Jupiter 11,06 mal größer ist als die Erde, sein Halbmesser demnach

70,530 km mißt. Wollen wir also die Anziehungskraft des Jupiter in Einheiten jenes Konventionsmeters ausdrücken, so haben wir zunächst die Werte von r in unserer Tabelle auf S. 49 mit 70,530,000 zu multiplizieren und dann den Wert von g mit Hilfe der weiter oben angegebenen Formeln zu berechnen. Dies ergibt dann die gesuchte Anziehungskraft in der Entfernung des betreffenden Satelliten.

Es wird aber gut sein, um die Kräfte der verschiedenen Himmelskörper miteinander zu vergleichen, sie alle auf die Wirkung aus ein und derselben Entfernung zu beziehen. Wir wählen dafür die Größe des oben angegebenen Erdhalbmessers und nennen diese $R = 6,377,400$ m. Setzen wir nun auch r in Einheiten des Erdhalbmessers an, behalten aber für u die Einheit des Tages bei und nennen die Anzahl der Sekunden des Tages $S = 86,400$, so ist nach dem Vorangegangenen $g = \frac{4\pi^2 R r^3}{S^2 u^2}$; oder, indem wir den konstanten Faktor $f = \frac{4\pi^2 R}{S^2} = 0,03372$ einführen: $g = f\frac{r^3}{u^2}$, wobei dann g unmittelbar in Metern für die Sekunde erhalten wird. Für Jupiter ergibt diese Formel, indem man seinen ersten Satelliten ($r = 5,933 \times 11.06$) wählt, $g = 3047$ m. Wählen wir einen Satelliten des Saturn aus, z. B. Titan, dessen Entfernung vom Saturnmittelpunkte gleich 190,2 Erdhalbmessern ist, während er sich in 15,945 Tagen um jenen Planeten bewegt, so erhalten wir $g = 91,23$ m, also wesentlich weniger. Die anziehende Kraft des Saturn ist im Verhältnis von 3047 zu 91,23 geringer als die des Jupiter. Wir kennen sowohl die Umlaufszeit wie die Entfernung der Erde von der Sonne, vermögen also auch sofort die Kraft der Sonne zu berechnen. Aus der oben angeführten Sonnenparallaxe folgt, daß die Sonne 2331 Erdhalbmesser von uns entfernt ist. Die Umlaufszeit der Erde ist aber gleich einem Jahre, oder 365,26 Tagen. Mit diesen beiden Zahlen erhält man $g = 3,201,000$ m. Die Kraft der Sonne ist also eine ganz ungeheuer große, selbst verglichen mit der des Jupiter. Da nun ebenfalls die Erde von einem Mond umkreist wird, können wir auch deren Kraft finden. Der Mond steht 60,275 Erdhalbmesser von uns entfernt und bewegt sich in 27,32 Tagen um unseren Planeten. Das ergibt 9,89 m für die Kraft, mit welcher die Erde den Mond regiert.

Die Sonne zieht nun nicht nur die Erde, sondern auch alle Körper in ihrer Sphäre mit einer Kraft an, die sich durch $g = 3,201,000$ m bemißt, wie es in der Tat alle Beobachtungen bestätigen, anderseits aber auch die Erde nicht nur den Mond, sondern alle Körper, also auch die Sonne mit der Kraft $g = 9,89$ m. Infolgedessen kann die Wirkung der Sonne auf die Erde nur gleich der Differenz dieser beiden Zahlen sein. Wir können aber diesen Abzug hier vernachlässigen, weil wir ja ohnehin bei der Zahl für die Sonne nur einen bis auf 1000 m angenäherten Wert angegeben haben. Dagegen hat die Beobachtung gezeigt, daß das entsprechende Verhältnis zwischen Erde und Mond ein bei weitem nicht so ungleiches ist. Die Beobachtungen ergeben, daß die Anziehungskraft des Mondes auf den Mittelpunkt der Erde sich durch $g = 0,121$ m ausdrückt. Diesen Wert müssen wir also von dem für die Erde allein gefundenen abziehen, um diejenige Kraft zu finden, die wir durch Beobachtungen in unserer nächsten Umgebung wiederzuentdecken hoffen. Es folgt also das für die Mondanziehung korrigierte $g = 9,77$ m.

Wir sind damit von den Himmelsräumen zur Erde herabgestiegen und kennen eine Eigenschaft der letzteren, deren notwendigen Wirkungen wir auf ihrer Oberfläche nachspüren können.

Weitergehende analytische Untersuchungen beweisen, daß die elliptischen, allgemeiner die Kegelschnittbewegungen, welche die Himmelskörper umeinander beschreiben, eine strenge Folge der physikalischen Voraussetzungen sind, die wir deswegen gemacht haben. Wir können aus diesem Grunde die Ergebnisse dieser Untersuchungen in folgenden Sätzen zusammenstellen:

1) Jeder Körper, der nicht unter dem Einfluß eines anderen Körpers steht, bewegt sich in unveränderlich geradlinigem Wege weiter.

2) Ein Körper, der unter dem Einfluß eines anderen aus seinem ursprünglichen Weg abgelenkt wird, würde mit der Geschwindigkeit und in der Richtung der Tangente an seine Bahn von dem Punkt, auf welchem er sich in der letzten Zeiteinheit befand, geradeaus weiterlaufen, wenn der Einfluß des anderen Körpers aufhörte.

3) Bewegt sich ein Körper unter dem beliebig zu bemessenden Einfluß einer zentralen Kraft, so durchläuft sein Radius in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume.

4) Soweit wir praktisch ermitteln konnten, ziehen alle Himmelskörper alle anderen zwar ungleich stark, aber so an, daß die Anziehungskraft für ein und denselben Körper mit dem Quadrate der Entfernung abnimmt.

5) Aus der Verbindung der Bedingungen 3) und 4) folgt, daß alle diese Himmelskörper in Kegelschnitten umeinander laufen, in deren einem Brennpunkt einer derselben steht.

6) Es ergibt sich ferner aus den obigen Bedingungen, daß für zwei Körper, die einen dritten umkreisen, sich die Quadrate der Umlaufszeiten verhalten wie die Kuben der halben großen Achsen ihrer Bahnen.

7) Für unsere Erde ist das Maß dieser Anziehungskraft für die Entfernung des Äquators von ihrem Mittelpunkt und die Sekunde $g = 9{,}77$ m; d. h. ein Körper, den man auf der Erdoberfläche am Äquator frei fallen läßt, hat nach Ablauf der ersten Sekunde die oben angegebene Geschwindigkeit angenommen.

Wir werden im folgenden Kapitel den Wirkungen dieser Gesetze und Kräfte auf unserer Erdoberfläche nachspüren.

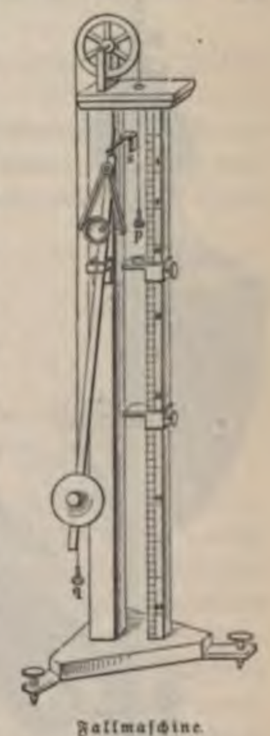
2. Die Schwerkraft.

a) Die Fallgesetze.

Die Anziehungskraft der Gestirne, deren Gesetze wir im vorigen Kapitel ermittelt haben, erweist sich gegenüber unserer feinsten Beobachtungskunst als vollkommen konstant für jeden Himmelskörper. Wir sind in der Lage, dies mit größter Genauigkeit feststellen zu können, denn wir sahen, daß die Geschwindigkeiten der Körper in ihren Bahnen von der Größe dieser Anziehungskraft unmittelbar abhängen. Wenn sich aber die Geschwindigkeit ändert, so ändert sich auch die mittlere Umlaufszeit, die, wie man leicht einsieht, mit großer Sicherheit zu bestimmen ist. Damit verhält es sich wie mit der Beobachtung eines Uhrzeigers. Wenn eine Uhr gegen eine andere auch nur täglich eine Sekunde abweicht, so macht dies in zwei Monaten schon eine Minute; man kann also diesen kleinen Fehler von einer Sekunde selbst an dem trägen Minutenzeiger dann sehr deutlich erkennen und recht genau messen. Die beiden himmlischen Zeitzeiger, die wir Sonne und Mond nennen, geben nun den Zeitpunkt, in dem sie auf dem großen Zifferblatte des Himmelsgewölbes genau zusammentreffen, durch das Ereignis einer Sonnenfinsternis kund, das keinem Menschen, nicht einmal den Tieren, unauffällig bleibt und deshalb in den Annalen der ältesten Völker verzeichnet wurde. Wir haben also gewissermaßen himmlische Uhrvergleichungen bis in die Zeit von vier Jahrtausenden von der Gegenwart zurück zur Verfügung. Es ergab sich aus ihrer Bearbeitung, daß der Mond in der Tat beständig ein wenig vorgeht, im Jahrhundert elf Sekunden; das macht für jeden seiner Umläufe etwa acht Tausendteile einer Sekunde. Wäre diese sogenannte Akzeleration der Mondbewegung wirklich

die Folge einer Veränderlichkeit der Anziehungskraft unseres Planeten, so würde diese, d. h. die Größe g, im Jahrhundert um den zehnten Teil eines Millimeters zunehmen. Diese ungemein geringe Größe ist aber bereits ein Maximum, bis zu dem eine Veränderlichkeit der Anziehungskraft sich vor unserer Beobachtung verstecken könnte, während man anderweitige Erklärungen für diese Abweichungen der Mondbewegung kennt, auf die wir zum Teil später zurückkommen.

Diese Unveränderlichkeit der Anziehungskraft der Himmelskörper macht es uns zur Gewißheit, daß wir ihre Wirkungen auf der Oberfläche der Erde wiederfinden müssen, wenn die Körper, die wir auf dieser antreffen, ihrem physikalischen Wesen nach nicht von den Himmelskörpern verschieden sind. Die irdischen Körper müssen sich dann unter der Anziehungskraft der Erde ganz ebenso wie die Himmelskörper verhalten, so daß wir von vornherein berechnen können, welche Wege sie unter gegebenen Verhältnissen beschreiben; wir können ihre Bahnen vorausberechnen. Geben wir z. B. einem Stein die Möglichkeit freier Bewegung, so muß er in der ersten Sekunde um die Größe $\frac{1}{2}$ g = 4,89 gegen den Erdmittelpunkt hinfliegen, nicht etwa um die im vorigen Kapitel gefundene Größe g. Das bestätigt sich, wie wir sogleich sehen werden, in der Tat. Man sagt, der Körper fällt gegen die Erde hin und nennt $\frac{1}{2}$ g den **Fallraum** in der ersten Sekunde. Es sind Apparate konstruiert worden, sogenannte **Fallmaschinen**, mit denen man den Fallraum messen kann, und von denen hierneben eine abgebildet ist. Über eine leicht bewegliche Rolle sind die gleichen Gewichte p und q gehängt, die sich das Gleichgewicht halten. Legt man auf p ein kleines Übergewicht, so zieht dies p mit hinab, jedoch in dem Verhältnis langsamer wie beim freien Fallraum g, als das Übergewicht in der Summe aller drei zu bewegenden Gewichte enthalten ist. Man kann also die Fallgeschwindigkeit nach Belieben verlangsamen. Um die Bewegung beginnen zu lassen, wird die Fallbrücke s, auf der das Gewicht p vorher stand, heruntergelassen. Gleichzeitig beginnt dann das durch die Brücke gesperrte Sekundenpendel zu schwingen, an welchem man die Fallzeit beobachten kann, ebenso wie den Fallraum an dem nebenstehenden Maßstabe. Hieraus kann man dann den freien Fallraum g ableiten.



Fallmaschine.

Die mit diesem Apparat erzielten Resultate weichen sowohl voneinander wie von dem aus astronomischen Beobachtungen gefundenen Werte von g ab. Bereits bei unserem ersten, auf der Erde angestellten Experiment müssen wir erkennen, daß die auf der Erde herrschenden Verhältnisse von der Reinheit und Durchsichtigkeit der zwischen den Himmelskörpern waltenden Beziehungen weit entfernt sind. Wir haben eine ganze Anzahl von störenden Beeinflussungen zu berücksichtigen, ehe wir den experimentell gefundenen Wert von g mit dem astronomischen in vollkommene Übereinstimmung bringen können.

Zunächst zeigt es sich, daß die den Erdkörper umgebende **Luft** dem Fall der Körper einen **Widerstand** entgegensetzt, der für verschiedene Körper verschieden groß ist. Körper, die wir leicht nennen, fallen langsamer als die schweren. Bringen wir aber schwere und leichte Körper, Flaumfedern, Holundermarkkugeln und Bleikugeln, zusammen in eine Glasröhre, aus der die

Luft entfernt worden ist, so fallen alle in ihr gleichschnell (s. die untenstehende Abbildung). Wir müssen also den Einfluß des Luftwiderstandes bei unseren Fallexperimenten möglichst auszuschließen oder doch in Rechnung zu ziehen suchen. Es soll hier nicht näher erörtert werden, wie dies bei der eben beschriebenen Versuchsanordnung geschehen kann, da wir bald eine andere kennen lernen werden, durch die g überhaupt weit genauer zu ermitteln ist.

Wir sehen also, daß von der Größe eines Körpers seine Fallgeschwindigkeit **nicht** abhängt, was ja auch daraus hervorgeht, daß nach unseren Ermittelungen im vorigen Kapitel der Mond selbst, auf die Oberfläche der Erde versetzt, in der ersten Sekunde denselben Fallraum durcheilen würde wie ein Stein, den wir aus unserer Hand fallen lassen, oder wie die Feder in der luftentleerten Röhre.

Fallversuch im luftleeren Raum.

Aber die Körper fallen in den nächsten Sekunden nicht nur um dieselbe Größe $^1/_2\,g$, denn würde nach der ersten Sekunde die Wirkung der Anziehungskraft überhaupt aufhören, so würde doch der Körper allein wegen des Trägheitsgesetzes unaufhörlich mit der Geschwindigkeit weitereilen, die er am Ende der ersten Sekunde erlangt hatte. Diese Geschwindigkeit ist nicht etwa $^1/_2 g$, denn dieser Fallraum in der ersten Sekunde entspricht offenbar einer **mittleren** Geschwindigkeit in dem ganzen Zeitraum der Sekunde. Wir erhalten diese mittlere Geschwindigkeit, indem wir das Mittel aus der Anfangs- und Endgeschwindigkeit nehmen. Die Anfangsgeschwindigkeit ist Null, also muß die gesuchte Endgeschwindigkeit gleich g sein, damit das Mittel aus Null und g die mittlere Geschwindigkeit $^1/_2 g$ ergibt. Wir sind somit in Übereinstimmung mit den Ergebnissen unserer astronomischen Untersuchungen. Während der zweiten Sekunde würde der Körper **ohne** die Einwirkung der Anziehungskraft der Erde sich ihrem Mittelpunkt um die Größe g, der Endgeschwindigkeit nach der ersten Sekunde, weiter nähern. Die Anziehungskraft aber bringt ihn, wie in der ersten Sekunde, noch um $^1/_2 g$ weiter. Er ist also im Laufe der zweiten Sekunde um $g + {}^1/_2 g = {}^3/_2 g$ gefallen, und der ganze Fallraum seit dem Beginn der ersten Sekunde ist $^1/_2 g + {}^3/_2 g = 2g$. Die Geschwindigkeit am Ende der zweiten Sekunde ergibt sich wie oben aus der Anfangsgeschwindigkeit g und der mittleren Geschwindigkeit $^3/_2 g$; sie wird danach $2g$. Die Anziehungskraft fügt dieser Geschwindigkeit im Laufe der dritten Sekunde noch weiter $^1/_2 g$ zu; der Körper durchläuft in dieser Zeit den Weg $^5/_2 g$, und der ganze, seit Anfang der Bewegung durchlaufene Weg ist $^9/_2 g$. Untersuchen wir diese Verhältnisse noch weiter, so finden wir ganz allgemein, daß, wenn t die Anzahl der während des freien Falles eines Körpers verflossenen Sekunden ist, die Endgeschwindigkeit $v = gt$ und der durchfallene Raum $s = {}^1/_2 gt^2$ ist. Man nennt eine so entstehende Bewegung eine beschleunigte und g die **Konstante der Beschleunigung**.

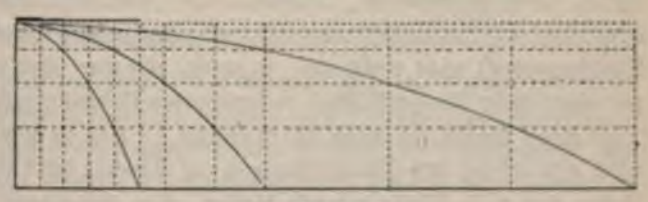
Indem wir hier g als unveränderlich annehmen, begehen wir nach den Erkenntnissen unserer Untersuchungen am Himmel einen Fehler, da g mit dem Quadrate der Annäherung an das Erdzentrum zunehmen muß. Wir können jedoch praktisch so große Fallräume nicht erzeugen, daß eine Veränderung des Abstandes vom Erdmittelpunkte während des Falles irgendwie in Betracht kommen könnte; daher ist die Vernachlässigung erlaubt, wenn es sich nicht um besondere Untersuchungen handelt, auf die wir noch zurückkommen.

Wir haben damit die beiden Hauptgesetze des freien Falles ermittelt, welche lauten:

1) Die Endgeschwindigkeiten eines frei fallenden Körpers auf der Erdoberfläche verhalten sich wie die Zeiträume, während welcher der Körper fällt. Sie werden erhalten durch den Ausdruck $v = gt$.

2) Die Fallräume verhalten sich wie die Quadrate der verwendeten Zeiten. Sie werden erhalten durch $s = \frac{1}{2}gt^2$.

Welche ungeheueren Geschwindigkeiten durch diese unausgesetzt beschleunigende Anziehungskraft der Erde in kurzer Zeit erzeugt werden, ersehen wir leicht aus diesen Formeln und empfinden es praktisch aus der großen Wucht, mit der aus bedeutender Höhe niederfallende Körper den Erdboden treffen; z. B. würde die größte Geschwindigkeit, die wir bei Kriegsgeschossen zu erreichen vermögen, etwa 600 m in der Sekunde, ein Körper, den wir nur frei aus der Hand fallen lassen, bereits nach 61½ Sekunden haben, also nun eine gleiche Kraft entfalten können wie die Geschosse. Freilich müßte der Körper, um die Möglichkeit eines so lang anhaltenden freien Falles zu erhalten, nach unserer zweiten Formel vorher um beinahe 18½ km über die Erdoberfläche gehoben worden sein, was, abgesehen von der praktischen Unmöglichkeit, einer sehr großen Arbeitsleistung entsprechen würde, die durch die Pulverexplosionen viel leichter ausgeführt wird. Außerdem mag hier gleich erwähnt werden, daß der Luftwiderstand, der für die alltäglichen Bewegungen fast verschwindend ist, für ungewöhnliche Geschwindigkeiten in unerwarteten Proportionen wächst, so daß er schließlich die größten Bewegungen gänzlich hemmt. Wir wissen, daß kosmische Körper mit Geschwindigkeiten von vielen Kilometern in der Sekunde in unsere Atmosphäre dringen und als Meteorsteine zur Erdoberfläche herabfallen. Dies geschieht aber mit keiner größeren Kraft, als ob sie nur aus wenigen hundert Metern im freien Fall zu uns gelangten. Alle übrige Geschwindigkeit haben sie durch den Luftwiderstand verloren und sich, da die Kraft, die sie mitbrachten, an sich nicht verloren gehen kann, dadurch heftig erhitzt.


Fallparabeln.

Es hat keine Schwierigkeit mehr für uns, den Weg eines Körpers vorherzusagen, den wir nicht frei fallen lassen, sondern dem wir eine gewisse Geschwindigkeit senkrecht zur Fallrichtung geben, indem wir ihn wagerecht mit einer bestimmten Kraft fortschleudern. Bei einem fortgeschleuderten Stein oder sonst einem Projektil zeigt die mathematische Behandlung, daß die beschriebene Kurve eine Parabel sein muß. Wir haben oben drei solche Fallparabeln mit den zugehörigen Anfangsgeschwindigkeiten (als gerade Linien oben links) abgebildet. Man kann bei Zugrundelegung der aus den Bewegungen der Himmelskörper abgeleiteten Größe von g bei Kenntnis der Anfangsgeschwindigkeit eines solchen Projektils seine Bahn genau so berechnen wie die eines Himmelskörpers, und die Beobachtungen, welche an den Wurfgeschossen für militärische

Zwecke mit Genauigkeit angestellt werden, beweisen die volle Gültigkeit der bisher ermittelten Gesetze dieser Bewegungen. Freilich bietet die theoretische Berücksichtigung des Luftwiderstandes leider immer noch so erhebliche Schwierigkeiten, daß diese Experimente des Artilleristen, in wie großartigem Maße sie auch heute ausgeführt werden, keine genügende Genauigkeit aufweisen, um etwa die Frage von der Veränderlichkeit von g in irgend einer Weise entscheiden zu können. Wir müssen uns nach anderen Methoden umsehen, um zu ergründen, ob die an den Himmelskörpern beobachtete Anziehungskraft auch wirklich ohne jeden Abzug für die irdischen Körper Geltung hat.

b) Veränderlichkeit der Fallhöhe mit der geographischen Breite.

Wir erfahren vom Astronomen, daß der ganze Erdkörper sich jeden Tag einmal um sich selbst bewegt. Alle Gegenstände auf dem Erdäquator beschreiben infolgedessen eine Kreisbahn um den Erdmittelpunkt, so daß deren Geschwindigkeit durch die Formel $s = \frac{2r\pi}{u}$ gefunden werden kann, die 464 m in der Sekunde ergibt. Ein Stein, der frei auf unserer Hand liegt, würde sofort mit dieser großen Geschwindigkeit, die beinahe der unserer kräftigsten Geschosse gleichkommt, davonfliegen, wenn die tägliche Umschwungsbewegung der Erde mit uns plötzlich stillstände. Dieser sogenannten „Tangential- oder Zentrifugalkraft", welche jedem Körper wegen der Erdumdrehung innewohnt, muß notwendig eine andere Kraft die Wage halten, denn wäre die Anziehungskraft nicht vorhanden, so müßte offenbar jeder Gegenstand auf dem Äquator sich mit einer dieser Tangentialkraft entsprechenden Geschwindigkeit von der Erdoberfläche erheben. Diese Kraft bemißt sich durch den Ausdruck $\frac{s^2}{r}$, was in unserem Falle 0,0337 m ergibt. Sie wirkt also infolge des Erdumschwunges am Äquator der Schwere entgegen und muß von der Größe 9,77 m in Abzug gebracht werden. Aus Experimenten am Äquator können wir nur $g = 9{,}74$ m erhalten. Am Pol dagegen erfahren die Körper gar keine Umschwungsbewegung. Die Anziehungskraft der Erde muß also vom Äquator nach den Polen hin zunehmen und ist veränderlich für jeden Standpunkt auf der Erdoberfläche. Das Gesetz dieser Zunahme, das wir notwendig kennen lernen müssen, um die Wirkungen der Anziehungskraft genauer zu verfolgen, würde sofort aufzuschreiben sein, wenn nicht noch zu berücksichtigen wäre, daß die Erde eine Deformation erfahren hat, abgeplattet worden ist.

Die Größe dieser Abplattung läßt sich indes ohne weiteres finden. Alle Körper würden, wie wir sahen, an den Polen eine um 0,0337 m größere Fallgeschwindigkeit besitzen als am Äquator, wenn die Erde eine genaue Kugel mit einem Durchmesser wäre, wie wir ihn für den Äquator gefunden haben. Im gleichen Maß sind auf solcher Kugel alle Körper leichter als an den Polen. Um ins Gleichgewicht am Äquator zu kommen, müssen die beweglichen Teile der Erde, also in erster Linie der Wassermantel, sich so gestalten, daß sie sich im Verhältnis zu diesem Unterschied am Äquator weiter vom Mittelpunkt entfernen als an den Polen. Wir werden somit die Abplattung wenigstens annähernd erhalten, wenn wir jene Verminderung derselben am Äquator 0,0337 durch die Anziehungskraft 9,77 dividieren und bekommen dann dafür 1 : 290, was der durch direkte Messungen gefundenen Größe der Abplattung in der Tat sehr nahe kommt. Die Entfernung der Erdoberfläche von ihrem Mittelpunkt ist um 6,377,400 : 290 m = 22,000 m an den Polen geringer als am Äquator. Genauere Messungen ergeben dafür 21,300 m. Die Form der Erde wird dadurch zu einem sogenannten Rotationsellipsoid, dessen zum Äquator senkrecht geführte Schnitte Ellipsen sind, die als große Achse den Äquatordurchmesser, als kleine Achse den Poldurchmesser haben. Es folgt daraus die Exzentrizität dieser Ellipse gleich 0,082. Je mehr wir uns auf der Erdoberfläche

dem Pol nähern, desto näher kommen wir auch dem Erdmittelpunkte. Wir haben aber erfahren, daß die Anziehungskraft mit dem Quadrate dieser Annäherung wächst. Auch dieser Umstand vermehrt noch weiter den Wert von g mit der geographischen Breite. Um beide Einflüsse zu berechnen, müssen wir die Entfernung eines beliebigen Punktes der Erde von ihrem Mittelpunkte kennen. Nennen wir diese Entfernung ϱ, die geographische Breite φ, die Exzentrizität des Erdellipsoids e, so findet man leicht, daß mit genügender Annäherung für unsere Zwecke $1 - \varrho^2 = e^2 \sin^2 \varphi$ ist, und daß also das Plus, welches die Anziehungskraft g allein durch die ellipsoidische Gestalt der Erde nach dem Pole zu erfährt, gleich $g e^2 \sin^2 \varphi$ ist. Unter Berücksichtigung verschiedener anderer Umstände ergibt sich schließlich, daß man, mit Inbegriff der Korrektion für die Zentrifugalkraft, die Anziehungskraft für eine beliebige Breite aus der Formel $g = 9{,}78062\,m + 0{,}05086 \sin^2 \varphi$ findet. Der Unterschied von 0,05 m in der Fallzeit am Äquator und am Pole würde bewirken, daß unsere schnellsten Geschosse am Pol etwa 200 m weniger weit fliegen als am Äquator. Innerhalb der Gebiete, in welchen genauere ballistische Untersuchungen angestellt werden, bleibt indes der Unterschied verschwindend klein, so daß man aus solchen Untersuchungen die Veränderlichkeit von g mit der Breite jedenfalls praktisch nicht ableiten könnte.

c) Das Pendel.

Es gibt ein ungemein einfaches Instrument, mit welchem man jene Fundamentalgröße mit ganz erheblich größerer Genauigkeit zu ermitteln vermag: das Pendel, jenes unscheinbare Werkzeug, das in fast keiner Wohnung fehlt, und das dem Physiker und dem Erdmesser über eine große Anzahl der verborgensten Dinge die genauste Auskunft gegeben hat. Irgend ein Gegenstand, sagen wir eine Metallkugel, der, an einem Faden aufgehängt, aus seiner nach dem Erdmittelpunkt als Lot gerichteten Ruhelage gebracht und nun seiner freien Bewegung überlassen wird, ist ein solches Wunderinstrument. Wir wollen zunächst ermitteln, wie sich seine Bewegung zu den Gesetzen der Anziehungskraft verhalten muß, die wir vorhin erforscht haben.

Wir setzen ein ideales, sogenanntes mathematisches Pendel voraus, das um den Aufhängungspunkt a in dem Bogen boc hin und her schwingt. Ihm soll dabei weder durch die Aufhängung selbst, noch durch die Schwere des Fadens, an welchem die Kugel hängt, noch endlich durch die Luft in seiner Bewegung irgend ein Widerstand geleistet werden. Dann wird die an dem Faden aufgehängte Kugel dem Gesetze der Anziehungskraft so weit gehorchen, als es ihr der Faden gestattet. In b losgelassen, kann sie zu dem tiefsten von ihr zu erreichenden Punkt o nur auf dem Bogenstücke bo gelangen. Sie wird zu diesem Wege längere Zeit gebrauchen, als wenn sie frei zu ihm hinfallen könnte, und zwar wird offenbar diese Zeit um so größer werden, je flacher der Bogen ist, über den sie hinpendelt, oder je größer die Länge des Pendels ao ist, die wir fortan l nennen wollen; denn würden wir das Pendel unermeßlich lang machen, so würde der Bogen zu einer für unser Messungsvermögen horizontalen Linie, und die Kugel würde sich überhaupt nicht mehr bewegen. Daß also die Zeit, welche das Pendel zu einer Schwingung, d. h. zu dem Wege von b nach c, gebraucht, von der Länge l abhängt, sehen wir ohne weiteres ein.

Die genaue mathematische Behandlung ergibt für die Schwingungszeit t eines Pendels von der Länge l den Ausdruck: $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \cdot \frac{\gamma}{\sqrt{2(1 - \cos\gamma)}}$

Hier ist γ der Ausschlagswinkel des Pendels aus seiner Ruhelage. Es läßt sich leicht übersehen, daß der zweite, nur von diesem Winkel abhängige Teil der rechten Seite dieser

Gleichung sehr nahe gleich 1 bleibt, solange der Winkel γ nicht groß wird. Sorgt man durch die Anordnung des Experimentes hierfür, läßt man das Pendel also nur kleine Ausschläge von wenigen Graden ausführen, so kann man diesen von γ abhängigen Faktor gänzlich vernachlässigen, und man erhält dann die sehr einfache Formel für die Beziehung der Schwingungszeit eines Pendels zu seiner Länge: $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

Diese wiederum nur auf rein mathematischem Wege gefundene Beziehung lehrt uns sehr interessante Dinge über die Eigenschaften des Pendels, die sich experimentell bestätigen lassen.

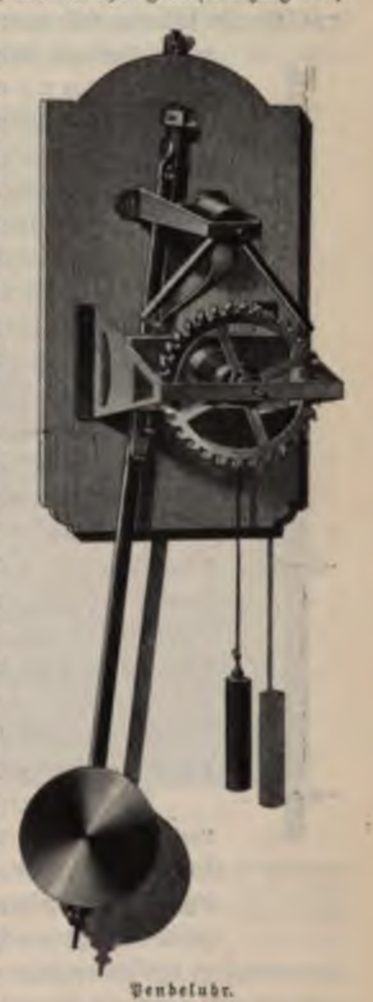
Zunächst zeigt es sich, daß die Zeit, welche das Pendel zu einer Schwingung braucht, fast ganz unabhängig ist von der Höhe, aus der man die Bewegung beginnen läßt, da man bei kleinen Ausschlagswinkeln diesen sogar ganz vernachlässigen kann. Bringt man also von zwei gleichlangen Pendeln das eine um 2 Grad aus der Ruhelage, das andere um 4 Grad, so werden ihre Schwingungen doch gleichzeitig geschehen, obgleich der von dem einen zurückzulegende Weg doppelt so lang ist als beim anderen. Wenn also die mit einem gewissen Ausschlagswinkel beginnende Pendelbewegung durch die unvermeidlichen Widerstände verschiedener Art, die wir vorhin andeuteten, kleiner und kleiner wird, so verändert sich dadurch doch der Zeitraum einer einzelnen Schwingung fast gar nicht. Der sogenannte Isochronismus der Pendelschwingungen ist die wichtigste Eigenschaft unseres so einfachen Instrumentes, das dadurch zum vorzüglichsten aller Zeitmeßwerkzeuge geworden ist. Jedermann weiß, daß die Pendeluhren, gewöhnlich „Regulatoren" genannt, am besten gehen.



Joost Bürgi. Nach einem alten Holzschnitt.

Das Verdienst, das Pendel zur Zeitmessung eingeführt oder doch die Eigenschaften des Pendels für diesen Zweck erkannt zu haben, gebührt drei vortrefflichen Männern in fast gleichem Maße. Der erste, der das Pendel in dieser Hinsicht anwandte, war Joost Bürgi (s. die obenstehende Abbildung), der zuerst Uhrmacher, dann aber bald Astronom bei dem gelehrten Landgrafen Wilhelm IV. von Hessen war und wegen seines Erfindungsreichtums den Ehrentitel eines neuen Archimedes von seinem fürstlichen Kollegen erhielt. Es war dies gegen Ende des 16. Jahrhunderts. Bis dahin kannte man nur die sogenannten Gewichtsuhren. Bei ihnen zog ein Gewicht an einer Schnur, die um eine Walze gewickelt war und durch irgend einen Reibungswiderstand am schnellen Abrollen verhindert wurde. Die jeweilige Lage des langsam tiefer sinkenden Gewichtes oder die entsprechende Anzahl von Umdrehungen der Walze, welche auf einem Zifferblatt abzulesen war, gab die seit dem „Aufziehen" der Uhr verflossene Zeit an. Solche Uhren konnten begreiflicherweise auf große Genauigkeit keinen Anspruch machen. Die Einfügung des Pendels in diese Gewichtsuhren geschah nun so, daß man an dem Pendel nahe unter seinem Aufhängungspunkte rechts und links je einen Haken, den Anker, anbrachte, der also bei jeder Schwingung

abwechselnd hoch und niedrig zu stehen kommt. Unter diesem Anker ist ein mit langen Zähnen versehenes sogenanntes **Steigrad** so angeordnet, daß die Ankerhaken abwechselnd in das Rad eingreifen. Wird dieses nun durch irgend eine Kraft gezwungen, sich weiter zu drehen, so oft die Haken es ihm gestatten, so wird es bei jeder Pendelschwingung um einen Zahn weiter gehen. Das Steigrad zählt also die Pendelschwingungen. Durchaus nur aus alter Gewohnheit benutzte man nun das Gewicht wieder, um dem Steigrad seinen Drehungsimpuls zu geben, während doch nun das Gewicht eine ganz andere, jetzt sehr untergeordnete Rolle spielte und man die Drehung durch irgend eine andere, ihrer Größe nach eigentlich ganz beliebige Kraft hätte ersetzen können. Nebenbei hat diese Kraft noch die Aufgabe, durch den Druck, welchen sie durch Vermittelung des Steigrades auf das Pendel ausübt, ihm den Verlust zu ersetzen, den seine Bewegung durch den Widerstand der Luft u. s. w. erleidet. Pendel, Steigrad und Gewicht sind alles, was man zur Konstruktion des vollkommensten Zeitmeßwerkzeuges notwendig gebraucht; alles übrige Räderwerk dient nur dazu, uns die Zählung der Umdrehungen des Steigrades zu erleichtern (s. die nebenstehende Abbildung).



Pendeluhr.

Ob Bürgi bereits eine Pendeluhr in dieser Weise konstruiert hat, konnte nicht mit Sicherheit ermittelt werden; man weiß nur, daß er das Pendel für die Zeitmessung verwendete. Nach ihm entdeckte zu Anfang des 17. Jahrhunderts der große **Galilei** den Isochronismus des Pendels, wie man sich erzählt, durch die Beobachtung von der Decke herabhängender, sich an verschieden langen Seilen hin und her bewegender Leuchter im Dom zu Pisa. Das Hauptverdienst Galileis, der gemeiniglich nur als der fanatische Verfechter des kopernikanischen Weltsystems bekannt ist, besteht überhaupt in der Entdeckung der Fallgesetze, durch welche er eine ganz neue Anschauungsweise über die Wirkung der Kräfte anregte und dadurch eine mächtig reformierende Bewegung in die Physik brachte, die damals noch völlig in aristotelischen Anschauungen steckte. Galilei benutzte das Pendel zweifellos zur Messung kleiner Zeitintervalle, und es wird behauptet, daß die wirkliche Konstruktion einer Pendeluhr zu seinen letzten Erfindungen zählte. Aber der eigentliche, erfolgreiche Erfinder der Pendeluhr war der niederländische Mathematiker und Physiker **Huygens**, der 1657 seine Erfindung patentieren ließ und die Theorie des Pendels ausführlich bearbeitete.

Es ist begreiflich, daß diese Theorie schließlich doch nicht so einfach ist, als wir sie im vorangegangenen dargestellt haben, denn es ist eben unmöglich, die idealen Verhältnisse herzustellen, die wir zunächst voraussetzen mußten. Wir können hier nur diese Einflüsse andeuten.

Wir sehen, daß an ein und demselben Orte der Erde, für den die Schwerkraft bekanntlich konstant bleibt, die Schwingungsdauer durchaus nur von der Länge des Pendels abhängt. Bleibt diese unveränderlich, so haben wir auch im Pendel das gewünschte unveränderliche

Zeitmaß. Es ist nun aber kein Material aufzutreiben, das unter allen Umständen eine unveränderliche Größe besitzt. Einige Gegenstände, wie namentlich die aus organischen Stoffen hergestellten (ein Faden), verändern ihre Länge bei Schwankungen des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft, andere Stoffe, wie die Metalle, sind stärker wie diese mit der Temperatur veränderlich, was wir später noch näher ergründen werden. Nun kann man leicht überblicken, wie empfindlich eine Pendeluhr auf solche Schwankungen reagieren muß. Soll ihr Pendel genaue mittlere Sekunden schlagen, soll es ein sogenanntes einfaches Sekundenpendel sein, so ist aus obigen Formeln sofort zu berechnen, daß es am Äquator 0,99098 m lang sein müßte. Setzen wir einmal voraus, das Pendel verlängerte sich nur um den zehnten Teil eines Millimeters, so folgt gleichfalls, daß dasselbe nicht mehr in einer Sekunde, sondern in 1,00005 Sekunde eine Schwingung ausführt; dies mit der Anzahl der Sekunden des Tages 86,400 multipliziert, zeigt, daß eine solche Uhr täglich um 4 Sekunden nachgehen würde, oder in 14 Tagen schon eine Minute. Eine solche Uhr würde man aber heute als eine sehr schlechte bezeichnen. Die Astronomen sind im stande, ihre Pendeluhren bis auf ein paar Hundertstel einer Sekunde täglich zu kontrollieren. Nehmen wir hierfür nur einmal 0,05 Sekunde an, so ist dadurch also eine einzelne Pendelschwingung bis auf 0,0000006 Sekunde festgestellt, oder die Länge des Pendels bis auf 0,000001 m oder ein Mikron. Wir sehen daraus, ein wie wunderbar feines Meßinstrument das Pendel hierdurch wird.



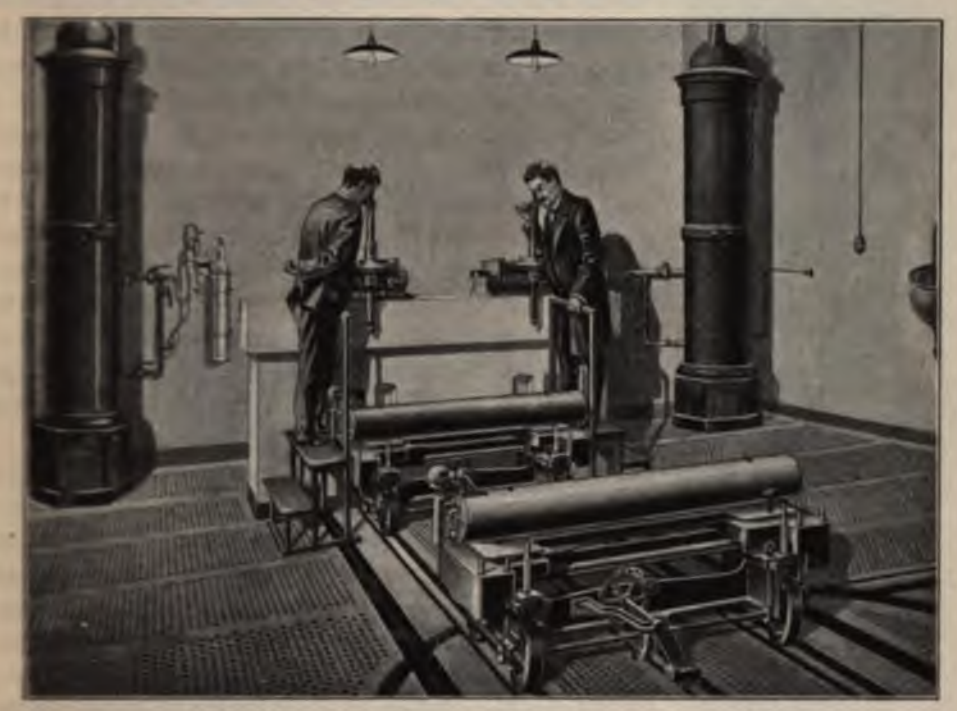
Reversionspendel. Vgl. Text, S. 63.

Um nun die Pendellänge möglichst konstant zu erhalten, hat man das Rostpendel erfunden, das aus mehreren miteinander verbundenen Stangen aus verschiedenen Metallen besteht, die durch die Wärme in verschiedenem Maß ausgedehnt werden. Durch eine geschickte Konstruktion wird mit ihrer Hilfe das Pendel ziemlich gleichlang erhalten. Für die genauesten Messungen liebt man indes solche Kompensationen durch eine noch so sinnreiche und gutarbeitende Konstruktion nicht, da jeder neu hinzukommende Teil immer wieder neue Fehlerquellen befürchten läßt. Man baut dafür das Pendel in möglichst einfacher Weise aus einem Metall, dessen „Ausdehnungskoeffizienten" (s. Seite 156) man genau ermittelt hat, und berücksichtigt nun den Einfluß der Wärme auf die Pendellänge durch Rechnung.

Immerhin wird auf diese Weise der „Faden" des idealen Pendels zu einem materiellen Körper von sehr meßbarem Gewichte, der die Bewegung der Pendelkugel (für die man, um der Luft möglichst wenig Fläche bei der Schwingung zu bieten, einen linsenförmigen Körper nimmt) beeinflußt. Es muß der „Schwerpunkt" des ganzen Pendelkörpers gefunden werden, dessen Entfernung vom Aufhängungspunkt als Pendellänge zu nehmen ist. Will man mit dem Pendel nur Zeitmessungen ausführen, so gebraucht man zwar eine genaue Kenntnis der Pendellänge nicht. Man richtet den Linsenkörper auf der Stange beweglich ein und verschiebt ihn so lange, bis die gewünschte Schwingungsdauer erreicht ist, was immer durch die Vergleichung mit einer richtig gehenden Uhr oder direkt mit dem Himmel geschehen kann.

Die astronomischen Präzisionsuhren baut man ganz einfach, damit sie möglichst wenigen unberechenbaren Einflüssen ausgesetzt sind; man läßt sie mit den kleinsten noch für die Erhaltung der Pendelbewegung zulässigen Gewichten laufen; dadurch wird der Ausschlagswinkel möglichst klein und damit die Bedingung des Isochronismus beinahe vollkommen erfüllt; man stellt sie in Keller- oder anderen Räumen auf, die geringen Temperaturschwankungen

unterworfen sind; man macht sie durch hermetischen Abschluß von der umgebenden Luft unabhängig von den Schwankungen des Luftdruckes, die die Korrektion für den Luftwiderstand verändern würden. Es wird auf diese Weise eine ganz wunderbare Regelmäßigkeit des Ganges erreicht, dessen unberechenbare Schwankungen im Durchschnitt nicht zwei Hundertteile einer Sekunde im Tag überschreiten. Ein Übelstand blieb immer in den Präzisionsuhren, das Räderwerk, welches die Übertragung der Sekundenschläge auf den Minuten- und Stundenzeiger besorgt. So viele Zähne, so viele Möglichkeiten unberechenbarer Störungen durch Staubteilchen, durch Verdickung des unvermeidlichen Öles und andere Umstände. Auch das Aufziehen des Gewichtes



Raum für konstante Temperatur im Normaleichungsamt Berlin. Vgl. Text, S. 63.

kann von störendem Einfluß werden, sobald es sich um Hundertteile von Sekunden handelt. Um alle diese Übelstände zu vermeiden, hat der Elektrotechniker Hipp in Neuchatel ein ungemein sinnreiches Instrument erfunden, das **Hippsche Pendel**, eine Uhr ohne Räder, ohne Gewicht, die eigentlich nur noch aus dem Pendel selbst besteht. Statt des Ankers, der in das Steigrad eingreift, besitzt dasselbe zwei feine Spitzen, die bei jeder Schwingung in kleine, mit Quecksilber gefüllte Näpfe eintauchen; hierdurch wird ein elektrischer Strom geschlossen, der an beliebig entfernter Stelle ein elektrisches Zifferblatt in Bewegung setzt, das nur die Aufgabe hat, die Anzahl der erfolgten Stromschlüsse zu zählen, aber sonst keine Rückwirkung auf die Bewegung des Pendels hat wie das Räderwerk der gewöhnlichen Uhren. Anderseits fehlt nun aber auch der dem Pendel notwendige Antrieb. Dieser wird bei dem Hippschen Apparate durch einen Elektromagneten besorgt, welcher sich unter dem Pendel befindet. Dieser Elektromagnet ist gewöhnlich ganz wirkungslos. Er übt nur für einen Augenblick seine Anziehungskraft aus, wenn der Ausschlagswinkel des Pendels unter eine gewisse Größe sinkt; dann greift eine am

letzteren befestigte, mitschwingende kleine Nase in eine Vertiefung und drückt dadurch eine Feder nieder, die den Stromschluß für jenen Elektromagneten ausführt. Dies geschieht also nur nach Bedürfnis durch das Pendel selbst, etwa alle zwei Minuten, und der Ausschlagswinkel wird dadurch fast völlig konstant erhalten. Die notwendige Störung der reinen Pendelbewegung durch eine hinzutretende Kraft geschieht hier also nur alle paar Minuten statt in jeder Sekunde, wie bei Anwendung des Steigrades.



Thermometer zur Regulierung der Temperatur im internationalen Maßbureau. Nach Guillaume, „Bureau international des poids et mesures". Vgl. Text, S. 63.

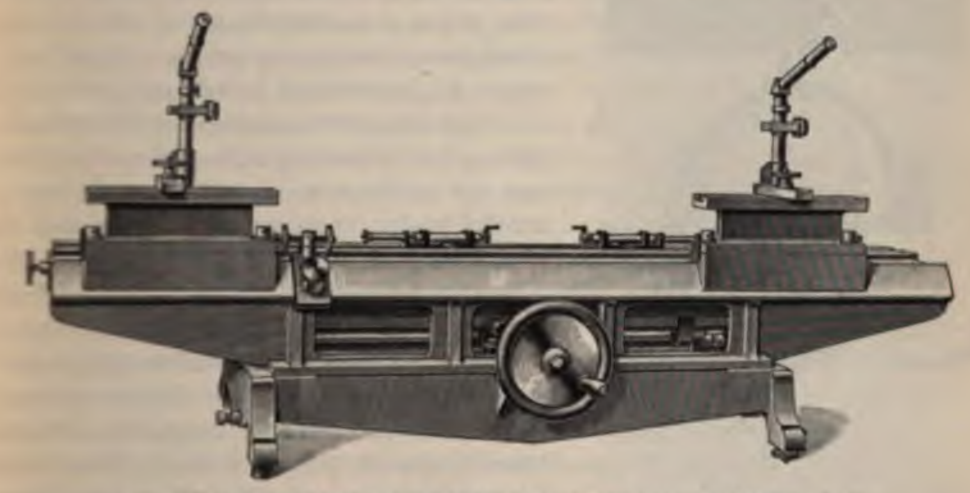
Die Normaluhren der Sternwarten, welche die Zeit mit der denkbar größten Genauigkeit aufbewahren sollen, werden, wie bereits erwähnt, in kellerartigen Räumen verschlossen, in denen astronomische Beobachtungen nicht angestellt werden können. Um die wertvolle Tätigkeit dieser Uhren aber dennoch jederzeit benutzen zu können, hat man ähnliche Kontaktvorrichtungen an ihrem Pendel angebracht, wie sie oben beim Hippschen Pendel beschrieben wurden, und diese setzen nun elektrische Zifferblätter oder die sogenannten Chronographen in den verschiedenen Beobachtungsräumen in Bewegung. Immerhin sind auch diese Kontakte eine neue Fehlerquelle. Der Verfasser hat diese zu vermeiden gesucht, indem er auf das Uhrgehäuse ein Mikrophon stellte, das auf die hörbaren Pendelschläge reagiert und seinerseits auf ein elektrisches Relais wirkt, das den stärkeren Strom für die Zifferblätter und die Chronographen einschaltet. Diese Vorrichtung funktioniert seither auf der Sternwarte zu Genf.

Das Pendel dient aber keineswegs nur zu genauen Zeitmessungen; seine vornehmste Aufgabe ist vielmehr, die Größe g, das Fundament unseres Gewichts- und Kraftmaßsystems, mit dem wir die Größe jeder anderen Naturkraft messen, mit letzter Genauigkeit zu bestimmen und wiederum durch die experimentell ermittelten Schwankungen von g mit der geographischen Breite die Gestalt der Erde zu finden.

Unsere Formel Seite 58 ergibt für die Länge des einfachen Sekundenpendels $g = \pi^2 l$. Da wir nun gesehen haben, mit welcher erstaunlichen Genauigkeit wir auf astronomischem Wege die Schwingungszeit des Pendels bestimmen können, so wird es nur noch darauf ankommen, die zugehörige Länge l sehr genau zu messen, um mit gleicher Präzision g zu finden.

Zu diesem Zweck mußte dem Pendel eine ganz besondere Form gegeben werden: das geodätische Pendel wurde konstruiert. Da es nun keine Uhr mehr sein sollte, so befreite man es zunächst von allem zählenden Beiwerk und selbst von Vorrichtungen, die ihm einen neuen Bewegungsimpuls geben sollten. Wenn man ein Pendel auf der Schneide eines fein geschliffenen Achatkeiles aufhängt, so kann es selbst in recht kleinen Ausschlagswinkeln stundenlang meßbar schwingen. Um die Schwingungsdauer zu bestimmen, stellt man das geodätische Pendel in einiger Entfernung vor dem Pendel einer astronomischen Uhr auf, die mit dem Himmel verglichen wird. Man stellt sich alsdann vor beide mit einem kleinen Fernrohr und

beobachtet, wie oft beide Pendel gemeinsame Schwingungsphasen zeigen, d. h. wieviel im Laufe der Zeit das eine Pendel dem anderen vorausgeht. Da man die Schwingungszeit des astronomischen Pendels genau kennt, erfährt man durch solche Koinzidenzbeobachtungen also auch die des geodätischen. Dieses wird nicht für die Veränderungen durch Wärme kompensiert, sondern man bemüht sich, die Temperatur während der Beobachtung möglichst konstant zu erhalten und genau zu messen, damit man die Messung der Pendellänge wieder bei genau derselben Temperatur ausführen kann. Es handelt sich nun noch darum, den Schwerpunkt des Pendels, dessen Abstand vom Aufhängungspunkte zu messen ist, zu kennen und deutlich sichtbar zu machen. Zu diesem Zwecke hat Bohnenberger das Reversionspendel erfunden, das später von Bessel wesentlich verbessert und praktisch in der höheren Erdmeßkunst verwendet wurde (s. die Abbildung, S. 60). Dasselbe ist genau symmetrisch gebaut; es besitzt also auch über der Aufhängungsschneide



Komparator von Bamberg zur Vergleichung von Maßstäben. Vgl. Text, S. 64.

einen Linsenkörper, wenn man ihn hier noch so nennen darf, während er für diesen Zweck eine mathematisch noch einfachere Form annimmt. Ebenso hat das Reversionspendel auch unten noch eine Schneide, so daß beide gleichweit von der Mitte der Stange entfernt sind. Man kann nun das Pendel umkehren (daher sein Name), d. h. einmal auf der einen und dann auf der anderen Schneide schwingen lassen, wobei man durch Verschiebung auf der Pendelachse die Lage der Linsenkörper so lange verändert, bis das Pendel in beiden Lagen dieselbe Schwingungszeit besitzt. Aus zwei derartig angestellten Beobachtungsreihen fallen alle Einflüsse der Form des Pendels auf seine Schwingungsdauer heraus, und die gesuchte Pendellänge ist gleich dem Abstande der beiden Schneiden, die eine genaue Messung zulassen. Die Messung der Pendellänge selbst geschieht endlich in besonderen Instituten, die mit bewundernswürdigen Instrumenten zur Maßvergleichung ausgestattet sind, in den Normaleichungsämtern. Unsere Abbildung S. 61 zeigt den Raum für konstante Temperatur im neuen Berliner Normaleichungsamte. Der Raum hat keine Fenster und steht unten in offener Verbindung mit den Kellerräumen. Er wird von doppelten Wänden umgeben, wie auch auf dem Längsschnitt des entsprechenden Raumes im Pariser Institut (vgl. die Abbildung, S. 12) zu ersehen ist. Durch eine Reguliervorrichtung (s. die Abbildung, S. 62) wird der Zutritt des Gases in den Gasheizöfen mittels sich ausdehnender

Flüssigkeiten so geregelt, daß man eine bestimmte gewünschte Temperatur in dem Raum erhalten kann. Die Ablesemikroskope für die Koinzidenzvergleichungen (s. die Abbildung, S. 61) befinden sich an besonders fundierten Pfeilern. Der Wagen trägt einen Trog, in welchem der zu messende Gegenstand in einer Flüssigkeit gehalten wird, deren Temperatur genau bestimmt wird. Einen **Komparator** einfacher Art, an welchem Trog, Ablesemikroskope und sonstige Hilfsvorrichtungen vereinigt sind, zeigt die Abbildung S. 63. Es ist auf diese Weise die Ausmessung der Pendellänge bis auf weniger als ein Mikron durchaus möglich.

Hat man so die Pendellänge gefunden, so ergibt die Multiplikation dieses Wertes mit dem Quadrate der Zahl π unmittelbar die Schwerkraft für den Ort, an welchem die Pendelbeobachtung stattfand. Bei Wiederholungen dieser Versuche an verschiedenen Orten der Erde wird gefunden, daß das einfache Sekundenpendel einen anderen Wert für jede geographische Breite hat. Alle derartigen Beobachtungen miteinander vereinigt, führen zu der Formel $l = 0{,}9909827\ \mathrm{m} + 0{,}00515358\ \mathrm{m}\ \sin^2\varphi$.



Aufhängung des Foucaultschen Pendels. Vgl. Text, S. 65.

Das einfache Sekundenpendel ist also unter dem Pol um volle 5 mm länger als am Äquator. Würde man eine auf letzterem genau richtig gehende Uhr an den Pol bringen, so müßte sie hier nicht weniger als 3 Minuten 45 Sekunden täglich vorauseilen. Eine solche Wahrnehmung machte der französische Astronom **Richer** zuerst, als er im Jahre 1671 mit einer in Paris richtig einregulierten Pendeluhr nach Cayenne reiste, um dort zum Zwecke der Sonnenparallaxen-Messung Marsbeobachtungen anzustellen. Er wunderte sich sehr, daß seine Uhr dort um 2 Minuten täglich zurückblieb, und er das Pendel um mehr als eine Pariser Linie verkürzen mußte, damit es wieder richtige Sekunden angab. Noch mehr erstaunte er, als die Uhr, nach Paris zurückgebracht, nun wieder um dieselben 2 Minuten vorauseilte, und er das Pendel auf die frühere Länge bringen mußte, um es wieder in Sekunden schwingen zu lassen. Er entdeckte damit die Veränderlichkeit der Pendellänge mit der geographischen Breite.

Da man aus dem Vorangegangenen leicht ermitteln kann, in welcher Weise der aus den Beobachtungen der Pendellänge unter verschiedenen Breiten abgeleitete Koeffizient von $\sin^2\varphi$ mit der Abplattung des Erdkörpers in Zusammenhang steht, so läßt sich die Form des Erdkörpers ganz allein aus den Pendellängen finden: der in seinem Glasgehäuse lautlos hin und her schwingende Stab verrät dem Denkenden die genaue Gestalt des Weltkörpers, auf dem er wandelt.

Die ungemein große Empfindlichkeit des Pendels setzt uns auch in die Lage, das Gesetz der quadratischen Abnahme der Anziehungskraft mit der Entfernung vom Erdmittelpunkte durch Beobachtungen auf Höhenstationen experimentell nachzuweisen. Unsere Formeln lehren uns, daß eine Pendeluhr mit je 1000 m Erhöhung über den Meeresspiegel (abgesehen von der Wirkung der zugleich erhöhten Zentrifugalkraft) um 13,56 Sekunden täglich nachgehen muß, was

die Beobachtung bestätigt. Praktische Messungen, die im Jahre 1899 von Hausky am Montblanc ausgeführt wurden, ergaben folgende Resultate:

	m	g		m	g
Chamonix	1050	9,80394	Grands Mulets . .	3050	9,79999
Brevent	2525	9,80056	Montblanc-Gipfel .	4810	9,79472

So hat uns also das Pendel das bei weitem schärfste Mittel an die Hand gegeben, die Größe g experimentell zu finden und nach allen Richtungen hin zu kontrollieren. Es hat sich dabei die Tatsache bestätigt, daß die auf der Erde beobachtete Anziehungskraft mit derjenigen, welche die Bewegungen der Weltkörper bewirkt, vollkommen identisch ist, und daß sie durch keinerlei irdische Einflüsse auch nur der leisesten Veränderung unterworfen ist. Wir können deshalb die Größe g als einen Maßstab für andere Kraftwirkungen verwenden, mit denen wir uns später zu beschäftigen haben werden. Diese Verwendung als Maßstab wird um so leichter, als die Anziehungskraft ja überall zugegen ist.

Wir werden uns später noch mit einer Anzahl anderer Untersuchungen zu befassen haben, die das Pendel ermöglicht, nachdem wir zuvor andere allgemeine Erfahrungen sammelten. An dieser Stelle aber dürfen wir nicht versäumen, eines höchst interessanten Experiments zu gedenken, das uns mit Hilfe des Pendels in den Stand setzt, die tägliche Umdrehung der Erde direkt vor Augen zu führen. Das ist der Foucaultsche Pendelversuch (s. die Abbildung, S. 66), bei welchem freilich die bisher erörterten Eigenschaften des Pendels gar keine Rolle spielen.



Schwingung des Foucaultschen Pendels.

Hängen wir ein Pendel derartig frei auf, daß eine Drehung seines Aufhängungspunktes keinen Einfluß auf seine Schwingung haben kann, so wird es offenbar in derselben Ebene, in der die Bewegung begonnen hat, auch weiter schwingen. Durch welche Hilfsmittel der mechanischen Konstruktion die oben gestellte Bedingung mit möglichster Vollkommenheit erreicht werden kann, soll hier nicht näher erörtert werden, da das gegenwärtige Werk keine praktische Experimentalphysik darstellen soll. Man wird sich aber nach der auf Seite 64 stehenden Zeichnung leicht vorstellen können, wie ein solches Instrument eingerichtet ist. Könnte man dieses Pendel am Erdpol in Bewegung setzen, so daß es anfangs etwa in der Ebene des Meridians von Berlin schwingt, der in diesem Augenblick zusammenfallen möge mit der Richtung nach einem gewissen festen Sterne, oder bei unserem oben abgebildeten Apparat in der Richtung des Bügels, so hat das Pendel gar keine Veranlassung, diese Richtung zu verlassen, während der Meridian von Berlin mit den übrigen Meridianen der Erde unter dem Pendel die tägliche Drehung des Planeten ausführt. Das Pendel wird also nach einer gewissen Zeit, die genau dem Zeitunterschied zwischen Berlin und Paris entspricht, in der Richtung des Meridians dieser letzteren Stadt schwingen, dann gegen Madrid zu und so weiter. Dabei behält es die Richtung nach dem Sterne bei, der während der täglichen scheinbaren Bewegung des Himmels gleichzeitig die Meridiane jener Städte passiert. Haben wir uns dabei auf der Erdoberfläche diese Richtungen, die das Pendel nach und nach einnimmt, notiert, so werden wir finden, daß die im Lauf einer Stunde beobachtete Richtungsänderung 15 Grad oder den 24. Teil des ganzen Umfanges beträgt, und sehen also hieraus, daß unser Planet sich in 24 Stunden einmal um seine Achse dreht.

Die gleiche Wahrnehmung macht man aber nicht am Äquator, denn hier bewegt sich die Erde nicht unter dem Pendel herum, sondern trägt den ganzen Apparat mit sich weiter;

das Foucaultsche Pendel verändert hier seine Richtung zur Erdoberfläche gar nicht. Für die anderen geographischen Breiten muß die Drehung offenbar Werte zwischen 15 Grad in der Stunde und Null aufweisen. Eine leichte geometrische Betrachtung zeigt, daß die stündliche Abweichung des Pendels für die Breite $\varphi = 15^{0} \sin \varphi$ sein muß.

Die Experimente mit dem Foucaultschen Pendel sind meist in großartiger Weise als öffentliche Bestätigungen der Erdumdrehung angestellt worden. Um sich von störenden Einflüssen zu befreien, muß man ein möglichst langes Pendel anwenden, das wieder nur in öffentlichen Gebäuden, Kirchen u. s. w. aufgehängt werden konnte, die entsprechend hohe Räume besitzen. Wegen des großen Weges, den das lange Pendel beschreibt, wird auch die Abweichung bei der Erddrehung im Längenmaß beträchtlich und ist deshalb leichter wahrzunehmen. Bei dem ersten derartigen Versuche, der 1851 im Pantheon zu Paris ausgeführt wurde (s. die nebenstehende Abbildung), betrug die Länge des Pendels nicht weniger als 67 m, woraus sich nach der obigen Formel die Schwingungsdauer zu 8,2 Sekunden ergibt. Der bei der Schwingung zurückgelegte Weg maß 6,5 m, und es folgt, daß auf der Peripherie des Kreises, den die Umkehrpunkte des Pendels infolge der Erddrehung nach und nach beschreiben mußten, die Abweichung schon in einer Minute mehr als 1 cm betrug. Besonders denkwürdig wurde die Wiederholung dieses Experiments in einer Kirche zu Rom durch den gelehrten Jesuitenpater Secchi, also in derselben Stadt, in der zwei Jahrhunderte vorher Galilei die Lehre von der Bewegung der Erde abschwören mußte.

Foucaults Pendelversuch im Pantheon zu Paris.

Überall, wo man ein Foucaultsches Pendel schwingen ließ, fand sich seine stündliche Abweichung in Übereinstimmung mit der Rechnung, wodurch der vollkommenste und augenscheinlichste Beweis für den täglichen Umschwung der Erde gegeben ist.

d) Schwere, Masse, Dichte, spezifisches Gewicht und das Kraftmaßsystem.

Bei allen bisherigen Versuchen und Betrachtungen war es ganz gleichgültig, welche von den offenbar sehr verschiedenartigen Stoffen, die uns in der Natur umgeben, wir verwendeten, oder in welchen Mengen sie wirkten. Eine Flaumfeder fällt im leeren Raum ebenso schnell wie eine zentnerschwere Last; wir mögen ein Pendel aus Holz oder aus Platin konstruieren, bei gleicher Länge wird es immer gleiche Schwingungsdauer haben. Dies muß uns auffallen, da wir doch aus tausend Erfahrungen wissen, daß die verschiedenen Stoffe sehr verschieden „schwer" sind, und daß diese Schwere eine Folge der Anziehungskraft sein muß, die wir bisher untersuchten. In der Tat erfuhren wir, daß die Anziehungskraft keinen Augenblick zu wirken aufhört. Ist also die Bewegung des geworfenen Steines durch den Widerstand der Erdoberfläche zur Ruhe gekommen, so hört doch die Erde nicht auf, ihn weiter anzuziehen; der Stein übt deshalb einen beständigen Druck auf seine Unterlage aus. Weshalb ist nun dieser Druck so sehr verschieden nach den Körpern und den Mengen desselben Stoffes, da doch die Ursache des Druckes, die Anziehungskraft, überall die gleiche ist?

Die Antwort ist leicht zu geben. Nehmen wir einen Würfel aus irgend einem Stoff, etwa aus Eisen, dessen Kante 1 m mißt, und zugleich einen anderen von nur 1 cm Kantenlänge, aber gleichfalls aus Eisen, so ist der letztere im ersteren $100^3 = 1,000,000$ mal enthalten. Beide Würfel fallen gleich schnell. Verbinden wir nun mit dem Begriffe der Kraft den einer Arbeitsleistung, welche diese Kraft auszuführen hat, so ist offenbar die Arbeitsleistung, die den großen Würfel in derselben Zeit dieselbe Strecke weiterbringt, 1,000,000 mal größer als die, welche den Zentimeterwürfel zu bewegen hat, denn wir könnten den Meterwürfel in so viele Zentimeterwürfel zerschneiden und dann jeden einzelnen für sich fallen lassen. Da die Kraftleistung also während des Fallens der beiden Würfel um das Millionenfache verschieden ist, bleibt sie es auch, nachdem sie den Boden erreicht haben: der Meterwürfel muß also um 1,000,000 mal seine Unterlage kräftiger belasten als der Zentimeterwürfel.

Diesen Druck auf die Unterlage wendet man an, um die Körper gegeneinander abzuwägen. Hierzu dient uns die Wage (s. die Abbildung, S. 68), die im menschlichen Haushalt eine große Rolle spielt. Neben dem einfachen Hausgerät ist hier das exakteste wissenschaftliche Instrument abgebildet, wie es zur Kontrolle der feinsten Gewichte in dem Prüfungsamt für Maß und Gewichte in Paris zur Anwendung kommt (s. die Abbildung, S. 69). Wenn man einen starren Körper, den Wagebalken, auf einer Schneide in seiner Mitte balancieren läßt, so daß er horizontal, wagerecht, steht, so wirkt die Schwerkraft offenbar auf seine beiden Seiten gleich stark. Wir hängen nun gleichweit von der Mitte auf beiden Seiten Gegenstände an und finden wieder den Wagebalken horizontal: also braucht die Schwerkraft auch eine gleiche Arbeitsleistung, um beide zu bewegen; sie sind für die Schwerkraft gleich groß. Bestanden beide Gegenstände aus dem gleichen Stoffe, so mußten sie in der Tat gleich groß sein, wenn sie auch sehr verschiedene Formen besitzen mögen. Gesetzt den Fall, der eine Gegenstand sei eine Kugel aus Eisen gewesen, der andere ein Zentimeterwürfel aus Eisen, dann müssen wir den Durchmesser der Kugel so groß finden, daß sie genau das Volumen von 1 ccm besitzt. Da das Volumen einer Kugel $V = \frac{4}{3} r^3 \pi$ ist, erhalten wir den Durchmesser jener Kugel gleich 1,24 cm. Sollten wir es also nicht ohne weiteres für selbstverständlich erachten, daß jede Kraft um so größerer Anstrengung bedarf, je mehr Gegenstände sie zu bewegen hat, so könnten wir an solchen und ähnlichen Experimenten uns dies auch durch den Augenschein bestätigen lassen.

Man ist nun übereingekommen, von einem Körper, der n mal mehr auf seiner Unterlage lastet, der also n mal schwerer ist als ein anderer, zu sagen, daß er n mal mehr **Masse** besitzt. Bei gleichen Stoffen verhalten sich demnach die Massen wie die Volumina.

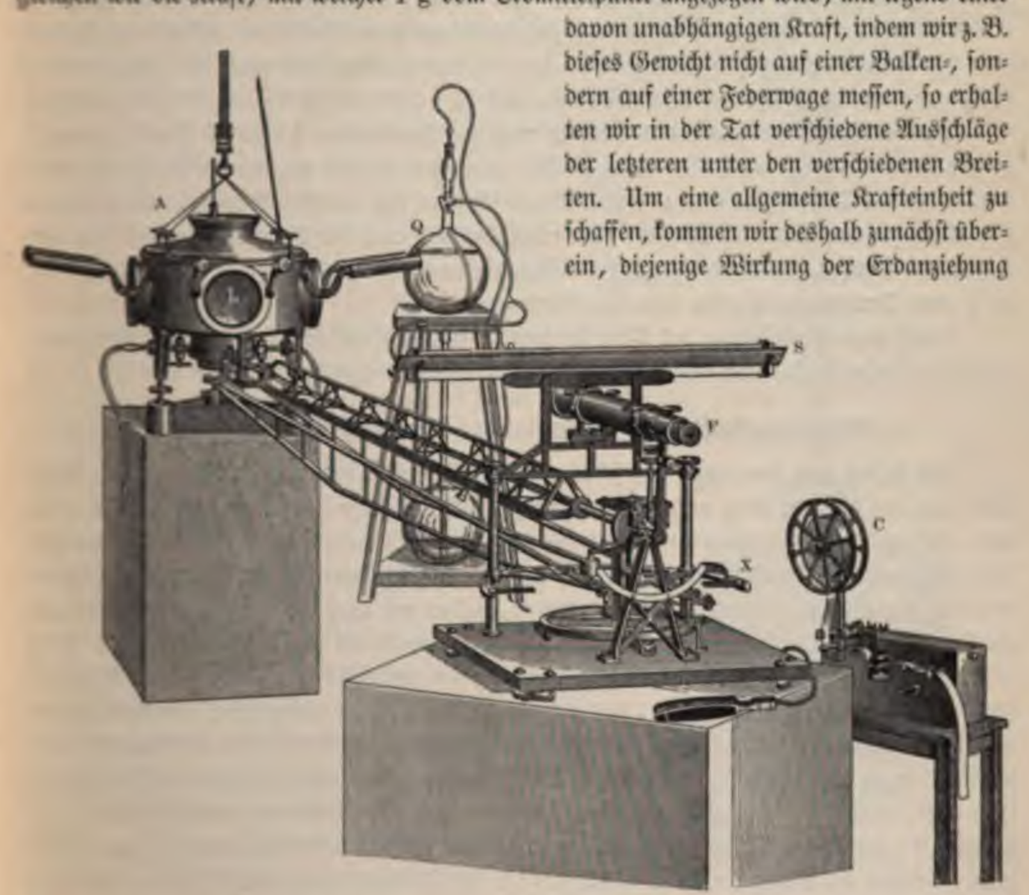
Dies ist aber durchaus nicht der Fall bei verschiedenen Stoffen. 1 ccm Aluminium ist viel leichter als 1 ccm Eisen. Legt man in die eine Wagschale 1 ccm Eisen, so muß man, um sie wieder einspielen zu lassen, in die andere Wagschale einen Würfel aus Aluminium legen, dessen Seitenlänge 1,41 cm mißt. Ein solcher Würfel hat 2,81 ccm Rauminhalt. Da die Schwerkraft der gleichen Anstrengung bedarf, um diese beiden verschieden großen Körper um die gleiche Strecke zu bewegen, müssen wir annehmen, daß in beiden doch nur eine gleich große Masse enthalten ist, daß also gewissermaßen die Materie im Aluminium lockerer verteilt ist. Wir könnten ja den gleichen Effekt erzielen, wenn wir den Eisenwürfel in kleine Teile zerschneiden und jedem derselben einen solchen Abstand vom nächsten geben, daß das Ganze nun einen Würfel von der Größe des Aluminiumwürfels einnimmt. Die Teile des Eisenwürfels befinden sich dann um so weniger dicht nebeneinander, je größer der als Maß für die Verteilung dienende andere Würfel ist. Man sagt deshalb: die Masse des Aluminiums oder schlechtweg das Aluminium selbst ist weniger **dicht** als das Eisen. Demnach findet man die **Dichtigkeit** d eines Körpers, indem seine Masse m durch sein Volumen dividiert wird, also $d = \frac{m}{v}$. Eisen ist 2,81mal dichter als Aluminium.



Wage. Vgl. Text, S. 67.

Da sich aber in dieser Hinsicht alle Körper verschieden verhalten, ist es unbedingt nötig, ein Übereinkommen für ein Normalgewicht zu treffen, das allen Messungen des Gewichtes, der Masse, der Dichte, der Kraft, der Arbeitsleistung u. s. w. zu Grunde zu legen ist, so wie wir das Konventionsmeter als Einheit der Längenmessung wählten. Wir haben zu dem Zwecke zunächst einen Körper zu bestimmen, dessen Dichte als Vergleichseinheit genommen werden soll. Man nahm das **Wasser** dafür, und zwar, da auch dieses wie alle Körper mit den Schwankungen des Wärmegrades verschiedene Ausdehnungen, d. h. verschiedene Dichte besitzt, Wasser in seinem dichtesten Zustande, der nach angestellten Versuchen bei + 4 Zentigrad eintritt. Als Einheit des Gewichtes nimmt man 1 ccm dieses Wassers an, den man ein **Gramm** genannt hat. 1000 g oder das Gewicht eines Kubikdezimeters Wasser nennt man ein **Kilogramm** u. s. f.

Handelt es sich nur um **Vergleichung** von Gewichtsmengen oder Massen, so kommt offenbar die Veränderlichkeit der Schwerkraft unter den verschiedenen Breiten nicht in Betracht, da 1 g eines bestimmten Stoffes unter allen Breiten immer ebenso stark angezogen werden wird wie 1 g irgend eines anderen Stoffes, denn beide werden eben im gleichen Maße schwerer mit der Annäherung zum Pol. Anders ist es dagegen, wenn wir ein Maß für die Kraft suchen. Vergleichen wir die Kraft, mit welcher 1 g vom Erdmittelpunkt angezogen wird, mit irgend einer davon unabhängigen Kraft, indem wir z. B. dieses Gewicht nicht auf einer Balken-, sondern auf einer Federwage messen, so erhalten wir in der Tat verschiedene Ausschläge der letzteren unter den verschiedenen Breiten. Um eine allgemeine Krafteinheit zu schaffen, kommen wir deshalb zunächst überein, diejenige Wirkung der Erdanziehung



Präzisionswage von Bunge im internationalen Maßbureau. Nach Guillaume, „Bureau international des poids et mesures“. Vgl. Text, S. 67. A Raum, in welchem sich die eigentliche Wage befindet. L Fenster, durch welches die Zunge mittels Lichtzeigers durch das Fernrohr F beobachtet wird. S Skala des Lichtzeigers. C Chronograph zur elektrischen Registrierung der Lichtzeigerbewegungen. X Handhaben zum Auflegen der Gewichte. Q Quecksilberluftpumpe zur Entfernung der Luft aus dem Raum A.

zu Grunde zu legen, die unter 45° Breite stattfindet. Hier hat ein fallender Körper nach der ersten Sekunde eine Geschwindigkeit von 9,81 m, und in allen folgenden Sekunden wird ihm eine Beschleunigung von der gleichen Größe erteilt. Man hat nun für wissenschaftliche Zwecke als **Einheit des Kraftmaßes** diejenige Kraft genommen, welche der Masse von 1 g in einer Sekunde eine Beschleunigung von 1 cm zufügen würde, und nennt diese Krafteinheit ein **Dyn** (griech., Dyne = Kraft). Sie ist 981mal geringer als die Schwerkraft der Erde. Für technische Zwecke ist diese Einheit indes zu klein und man wählte dafür die Kraft, mit welcher ein Kilogrammgewicht auf seiner Unterlage lastet. Diese technische Krafteinheit ist also gleich 981,000 Dynen.

Als Einheit der Arbeitsleistung einer Kraft nimmt man in dem für wissenschaftliche Zwecke gewählten Zentimeter-Gramm-Sekunden-System die durch ein Dyn bewirkte Fortbewegung eines Körpers um 1 cm und nennt diese Arbeitseinheit ein Erg (von Ergos, griech., = Arbeit). Für technische Zwecke wählt man dagegen das Kilogrammeter (kgm), das demnach 98,100,000 Erg hält. Dies ist also die Kraft, welche im stande ist, 1 kg um 1 m zu heben. Hierbei spielt zunächst die Zeit keine Rolle. Wir führen dieselbe ein, indem wir die ganze geleistete Arbeit durch die darauf verwendete Zeit dividieren und erhalten den Effekt der Arbeit oder die Arbeitsleistung pro Sekunde. 75 kgm in der Sekunde hat man eine Pferdekraft (PS) genannt; diese setzt sich also zusammen aus $75 \times 98{,}100{,}000 = 7{,}357{,}500{,}000$ Erg.

Da die Einheit der Masse das Gramm oder das Gewicht von 1 ccm Wasser ist, so ergibt unsere Formel $d = \frac{m}{v}$ die Dichte eines Stoffes verglichen mit der maximalen Dichte des Wassers, oder die Dichte gibt an, um wievielmal schwerer ein gewisser Raumteil eines Stoffes ist als ein gleicher Raumteil Wasser; man nennt deshalb auch die Dichte das spezifische Gewicht des Stoffes. Dasselbe ist ganz unabhängig von dem zu Grunde gelegten Maßsystem; es ist eine Verhältniszahl ohne besondere Benennung.

Durch diese Einführung des Metersystems in alle Maßverhältnisse ist endlich eine durchgreifende Einheitlichkeit und leichte Vergleichbarkeit aller betreffenden Angaben erzielt.

e) Anziehungskraft eines Kilogramms, Gewicht der Himmelskörper.

Wir haben uns überzeugt, daß jedes einzelne Massenteilchen, von der Schwerkraft beeinflußt, um den gleichen Weg weitergetragen oder in seinem Fluge beschleunigt wird. Wir wissen auch, daß es dieselbe Schwerkraft ist, welche die Himmelskörper bewegt. Diese müssen deshalb auch aus Massenteilchen bestehen. Da nun alle diese Himmelskörper sowohl ihresgleichen anziehen als auch von ihnen angezogen werden, haben wir auch von den Körpern in unseren Händen anzunehmen, daß sie eine gegenseitige Anziehungskraft aufeinander ausüben. Diese wird nur im Verhältnis zu der der Erde sehr gering sein und sich deshalb hinter ihrer Allgegenwart verstecken. Nach dem Prinzip, das für jede Wirkung eine gleichgroße Gegenwirkung fordert, ist ohne weiteres abzuleiten, daß ein fallender Stein im Verhältnis der Anzahl seiner Massen-, bezw. Gewichtsteile, Gramme, zu der Anzahl von Grammen, die die anziehende Erde schwer ist, auch auf diese anziehend wirkt. Könnten wir die Anziehungskraft des Steines ermitteln, so würde das Verhältnis derselben zu der der Erde unmittelbar angeben, um wieviel mehr Gramme die Masse der Erde enthält als die des Steines, oder wieviel schwerer die Erde ist als jener Stein.

Zu diesem interessanten Experiment, die ganze Erde auf die Wagschale zu legen, verhilft uns wiederum das Pendel. Wir lassen es in der Nähe von Gebirgen schwingen, dann zeigt es Abweichungen von anderen unter der gleichen Breite gemachten Pendelbeobachtungen, die in der besonderen Anziehungskraft des Gebirgsstockes auf das Pendel ihre Ursache haben. Hat das Gebirge keine zu unregelmäßige Form, und kennt man seine geognostische Zusammensetzung, so kann man auch sein Gewicht ungefähr aus dem spezifischen Gewichte der betreffenden Gesteinsart berechnen, worauf dann die Vergleichung seiner besonderen, durch das Pendel gefundenen Anziehungskraft das Gewicht der Erde ergibt. Aber man begreift wohl, daß hier große Unsicherheiten mit einlaufen. Insbesondere kennt man selten den wahren Aufbau des Gebirges genau genug. Auch hat das Pendel Abweichungen in weiten Ebenen gezeigt; so schwingt es z. B. in den Umgebungen von Berlin etwas langsamer, als es sollte. Letzteres rührt

daher, daß sich hier große Steinsalzlager befinden, deren spezifisches Gewicht geringer ist als das der übrigen Gesteinsarten der Erdrinde, also auch weniger Anziehungskraft ausübt. Solche **Massendefekte** scheinen auch unter den meisten Gebirgen vorhanden zu sein. An anderen Stellen schwingt das Pendel dagegen zu schnell; hier kann es unter Umständen schwere Erzlager unter der Erdoberfläche verraten. Alle diese Umstände zeigen uns, daß das Pendel nur unter der Voraussetzung exakte Werte gibt, daß man die Masse der Erde sich in ihrem Körper gleichmäßig verteilt denkt, was sicher nicht in vollkommener Weise der Fall ist. Es ist dies auch der Grund, weshalb die durch Pendelmessungen gefundene Abplattung der Erde, gleich $^1/_{289}$, nicht genau mit der durch direkte Messung erhaltenen ($^1/_{299}$) übereinstimmt. Aber gerade diese Abweichungen des Pendels von seiner durch direkte Erdmessung notwendigen Länge werden einstmals, wenn das Netz genauester Beobachtungen genügend weit über die Erde ausgespannt sein wird, zu den interessantesten Schlüssen über die Zusammensetzung des Erdinnern führen, was wir praktisch niemals erreichen können. Es ist wahrlich wunderbar genug, wie man heute schon im Mikroskop des Komparators im Eichamt durch die Ausmessung einer Pendellänge Erzlager entdeckt, die sich in den dunkeln Tiefen des Erdinnern verstecken.



Coulombsche Drehwage zur Bestimmung des Erdgewichtes.

Um aber das Gewicht der Erde in Kilogrammen zu bestimmen, müssen wir es mit der Anziehungskraft eines Kilogrammgewichtes direkt vergleichen können. Dies geschieht mittels der **Drehwage**, die von **H. Cavendish** zuerst für diesen Zweck angewendet und später von **Coulomb** verbessert wurde (s. die nebenstehende Abbildung). Sie besteht aus einem Stab, an dessen Enden je eine kleine Kugel angebracht und der mittels eines Fadens in seiner Mitte so aufgehängt ist, daß der Stab mit den Kugeln horizontal im Gleichgewichte ruht. Versucht man ihn nun ein wenig zu drehen, so strebt der dadurch aufgewickelte Faden sich wieder in seine frühere Lage zurückzudrehen; er besitzt eine **Drillung** oder **Torsionskraft**. Losgelassen wird der Stab einige Male hin und her pendeln, ehe er wieder in seiner Ruhelage verharrt. Es bedarf also einer gewissen, wenn auch sehr geringen Kraft, um den Stab in horizontaler Richtung aus seiner Ruhelage zu bringen. Diese Kraft, welche von der Beschaffenheit des Fadens abhängt, läßt sich durch geschickte Versuche bestimmen, so daß man sagen kann, wie viele Bruchteile eines Grammes jener Drehungswiderstand des Fadens bei einem bestimmten Ausschlage zu heben vermag, oder wie groß die Torsionskraft desselben in Dynen ist. Wir bringen nun in die Nähe jeder der beiden kleinen Kugeln je eine größere Kugel von genau 1 kg Gewicht und sehen, daß die kleineren Kugeln der Drehwage von den festen größeren Kugeln angezogen werden. Richtet man es so ein, daß beide Kugeln die Wage in derselben Richtung zu drehen streben, so wird sie nun eine andere Ruhelage einnehmen, bei welcher die Torsionskraft des Fadens der Anziehungskraft der beiden Kilogrammkugeln das Gleichgewicht hält. Aus dieser Abweichung der

Drehwage und Berechnung der zugehörigen Torsionskraft ergibt sich die Anziehungskraft der Kilogrammkugeln in dem betreffenden Abstande von den Kugeln der Drehwage.

Derartige Messungen haben nun gezeigt, daß eine Kilogrammkugel aus einem Abstande von 1 dm eine Anziehungskraft von 0,000666 Dyn ausübt. Da 1 g gleich 981 Dynen ist, so hält also ein Gewicht von 0,000666 : 981 = 0,000000679 g oder nicht viel mehr als ein halbes Millionstel Gramm jener Anziehungskraft von 1 kg die Wage. Wir haben es also mit einer ganz ungemein geringen Kraft zu tun; die wir niemals auf der Erde an den Körpern selbst entdeckt haben würden, wenn sie sich nicht in den ungeheuern Körpern der Planeten, insbesondere unserer Erde, mit jedem ihrer Massenteilchen so gewaltig summierte.

Durch jene Zahl 0,000666 Dyn ist das Gewicht der Erde unmittelbar gegeben. Es nimmt aber die Anziehungskraft mit jedem Massenteilchen zu, also ist offenbar diese Kraft $g = \frac{M}{R^2}$, wenn M die Masse des anziehenden Körpers, R der Abstand des Mittelpunktes des anziehenden von dem des angezogenen Körpers bedeutet. Für die Kilogrammkugel sind alle diese drei Größen, die wir zur Unterscheidung k, m und r nennen wollen, durch unser Experiment mit der Drehwage bekannt geworden; es ist nämlich k = 0,000666 Dyn, m = 1 kg, r = 1 dm. Für die Erde haben wir g als die Beschleunigung der Schwere kennen gelernt, und R ist gleich dem Abstande der Oberfläche vom Mittelpunkte der Erde. Die Größe M, die Masse der Erde, suchen wir. Da auch $k = \frac{m}{r^2}$ ist, so folgt $M = \frac{gR^2m}{kr^2}$. Die Ausrechnung ergibt als Gewicht der Erde in Kilogrammen eine Zahl, die mit 6 beginnt, der, abgerundet, 24 Nullen folgen, oder rund 6 Quadrillionen Kilogramm. Der Kubikinhalt der Erde, oder die Größe $\frac{4}{3}\pi R^3$ beträgt aber nur rund eine Quadrillion Kubikdezimeter, von denen jeder, mit Wasser angefüllt, 1 kg wiegt. Die Masse der Erde ist also durchschnittlich sechsmal schwerer als Wasser. Genauere Messungen haben für diesen Wert der **mittleren Dichtigkeit der Erde** 5,59 ergeben. Da die uns zugänglichen Oberflächenschichten wesentlich leichter sind, muß dagegen der Erdkern aus bedeutend schwereren Stoffen bestehen, was ja auch ohne weiteres anzunehmen war.

Die Anziehungskraft aller Körper hat sich nun direkt proportional ihrer Masse erwiesen. Unsere Betrachtungen über die verschiedene Anziehungskraft der Weltkörper (S. 51) setzen uns damit sofort in den Stand, das Gewicht derselben in Einheiten des Erdgewichtes, d. h. der Erdmasse, oder schließlich auch in Kilogrammen anzugeben. So fanden wir die Anziehungskraft der Sonne aus der Entfernung eines Erdradius g = 3,201,000 m, oder, durch 9,78 dividiert (der reinen, nicht von der Zentrifugalkraft beeinflußten Anziehungskraft der Erde), 327,000mal größer als die der Erde. Die Sonne muß also um ebensovielmal schwerer sein als unser Planet, oder 327,000 × 6 Quadrillionen Kilogramm wiegen. Da nun der Durchmesser der Sonne 108,7mal größer ist als der der Erde, wird das Volumen der ersteren 108,7 × 108,7 × 108,7 = 1,284,000mal größer. Die nur 327,000mal größere Masse der Sonne wird sich somit in ihrem Körper auf einen etwa viermal größeren Raum verbreiten, d. h. die Dichtigkeit der Sonnenmasse ist viermal geringer als die der Erde, oder ihr spezifisches Gewicht ist 5,59 : 4 = 1,4. Die Stoffe, aus denen der mächtige Zentralkörper unseres Systems zusammengesetzt ist, sind also durchschnittlich nicht wesentlich dichter als Wasser.

Alle diese Erfahrungen konnte uns das Pendel und die feinfühlige Drehwage, die übrigens in neuerer Zeit durch noch exakter arbeitende Instrumente, wie das **Horizontalpendel**, ersetzt wurden, vermitteln, wenn wir die Resultate unserer Experimente mit dem unfehlbaren Werkzeuge unserer Gedankentätigkeit, der mathematischen Analysis, zu der tieferen Gemeinsamkeit verbanden, die wir als unwandelbare Naturgesetze erkannten.

So hat in neuerer Zeit W. Pfaff mit einem von ihm erfundenen Instrumente, das nicht die Schwerkraft selbst, sondern nur ihre Änderungen sehr genau zu ermitteln vermag, über diese letzteren sehr interessante Untersuchungen angestellt. Sein Instrument zeigte z. B. die Differenz der Anziehungskraft an, welche zwischen Erdoberfläche und Erdmittelpunkt durch die Stellung von Sonne und Mond eintreten muß und die Erscheinungen der Gezeiten verursacht. Er fand, daß zur Neumondzeit zwischen Mittag und Mitternacht das Gewicht eines Kilogramms um 0,18 mg schwankte. Das stimmt völlig überein mit dem vorher von Helmert errechneten Werte. Sehr merkwürdig ist eine angedeutete Schwankung der Schwerkraft in den Jahreszeiten, die auch schon von Sterneck durch seine Pendelbeobachtungen nachgewiesen wurde. Die Schwere ist größer als der Durchschnitt im April und September, geringer im Januar und Juli. Hier sind noch tiefe Geheimnisse zu entschleiern.

3. Die Bewegungsgesetze starrer Körper oder die Mechanik.

Unter dem Einflusse der allgegenwärtigen Schwerkraft führen die Körper in unserer Umgebung Bewegungen aus oder befinden sich unter Zuständen, wie Druck, Spannung, Gleichgewicht u. s. w., die im täglichen Leben von der allergrößten Bedeutung geworden sind, da die Prinzipien, welche aus der Beobachtung dieser Bewegungs- oder Ruhezustände abgeleitet werden konnten, zur Konstruktion all unserer Maschinen und verschiedenartigsten Verkehrseinrichtungen, wie der Gewichts- und Federwagen, von Brückenbauten, Aufzugskranen, ja eigentlich bei all und jeder Baukonstruktion Verwendung finden.

Aber nicht nur wegen dieses praktischen Wertes ist das Studium dieser Zustände von hoher Bedeutung, sondern weil die durch weitere Beobachtungen zu kontrollierende Annahme, die Arbeitshypothese, jedenfalls zunächst berechtigt ist, daß die Wirkungen, welche die Schwerkraft auf die uns unmittelbar umgebenden greifbaren Körper ausübt, prinzipiell keine anderen sind, als sie von den später zu untersuchenden Naturkräften ausgehen. Wir können also wahrscheinlich aus der Beobachtung der Bewegungsvorgänge in dieser irdischen und sinnlich wahrnehmbaren Körperwelt Gesetzmäßigkeiten ableiten, da sie uns zugänglicher ist als der Weltenraum und die Welt der kleinsten Körper oder Atome, die wir gezwungen sind, als vorhanden anzunehmen, Gesetzmäßigkeiten, die eine allgemeine Bedeutung für die Vorgänge in allen Gebieten des Naturgeschehens haben. Wir versuchen es deshalb, uns bei dem Studium jener Bewegungen greifbarer Körper gelegentlich auch von den Wirkungen der Schwerkraft bei diesen Versuchen soviel wie möglich frei zu machen, um eben die Gesetze der Bewegungen als solche zu finden und nennen deshalb diesen Zweig des physikalischen Forschungsgebietes die allgemeine Mechanik der Bewegungen.

Die meisten der hierbei in Betracht kommenden Erscheinungen sind so alltäglicher Natur, daß es als eine gelehrte Pedanterie erscheinen mag, wenn man ihrer überhaupt Erwähnung tut. Es wird z. B. jedermann als selbstverständlich erscheinen, daß zwei gleiche Gewichte, welche man durch eine Schnur verbindet und über eine Rolle hängt, in jeder Höhenlage ruhend verharren; denn keines von ihnen besitzt ein Übergewicht, weil eben die gleichen Gewichte im Gleichgewicht sind (s. die Abbildung, S. 74). Und wirklich ist dies auch eine absolute Notwendigkeit, weil wir die hier erwiesene Gleichheit der Gewichte durch genau dasselbe Experiment nur in etwas veränderter Form in der Wagschale vorher konstatiert haben. Wenn die beiden gleichen Arme des Wagebalkens sich bei der Beschwerung durch die beiden Gewichte nicht

um ihren Aufhängungspunkt drehten, so kann es auch die Rolle nicht tun. Daß die Gewichte in jeder Lage, auch wenn das eine über der Rolle höher hängt als das andere, in Ruhe bleiben, beweist uns nochmals, daß die Schwerkraft innerhalb dieser Höhendifferenz die gleiche ist. Könnte das Experiment so angestellt werden, daß das eine der gleichen Gewichte um Kilometer höher hinge als das andere, so müßte das untere eine größere Anziehungskraft von der Erde erfahren als das obere und es deshalb emporziehen.

Anders wird die Sache dagegen, wenn wir die gleichen Gewichte mit ihren Schnüren an zwei Rollen mit verschiedenen Durchmessern befestigen (s. die Abbildung, S. 75 oben), die sich um eine gemeinsame Achse gleich schnell bewegen müssen. Dann wird das auf der größeren Rolle befindliche Gewicht alsbald zu sinken beginnen, indem es seine Schnur abrollt. Gleichzeitig rollt sich die an der kleineren Rolle befestigte Schnur auf und hebt das an ihr befindliche Gewicht. Das System der Rollen mit den gleichen Gewichten ist jetzt also nicht mehr im Gleichgewicht.



Gleichgewicht. Vgl. Text, S. 73.

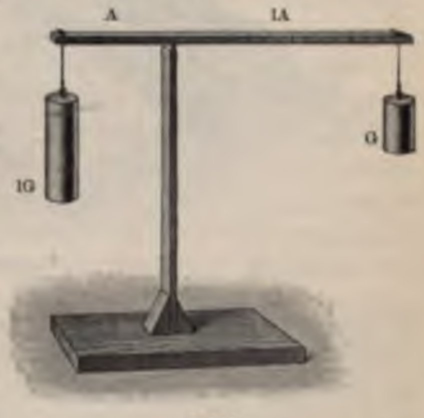
Während das eine Gewicht ab-, das andere aufsteigt, leistet die beide bewegende Schwerkraft eine Arbeit, die offenbar für beide die gleiche sein muß, da wir im vorigen Kapitel (S. 68) sahen, daß gleiche Massen unter allen Umständen gleichen Wirkungen von der unveränderlichen Gravitation ausgesetzt sind. Dem ersten Anschein nach sind aber bei unserem Experiment die Wirkungen verschieden. Das über der kleineren Rolle befindliche Gewicht steigt langsamer empor, als das andere sinkt. Wir sehen auch die Notwendigkeit davon ohne weiteres ein, denn ist etwa der Durchmesser der einen Rolle zehnmal größer als der der anderen, so ist auch ihr Umfang um ebensoviel größer; da aber beide Rollen sich in der gleichen Zeit nur einmal umdrehen, so wird von der einen Schnur nur immer der zehnte Teil der Länge frei, um welche sich die andere abrollt. Die durchlaufene Weglänge ist bei dem einen Gewicht zehnmal kleiner als bei dem anderen. Wir sagen nun im bürgerlichen Leben sowohl wie im rein physikalischen Sinne: das Gewicht leistet, indem es das andere emporhebt, eine Arbeit. Man kann, zwar nur, um eine mathematische Begriffserleichterung einzuführen, von einer positiven und einer negativen Arbeitsleistung sprechen. Das emporgehobene Gewicht leistet negative Arbeit. In unserem Falle müssen beide, die positive Arbeit des einen und die negative des anderen Gewichts, einander gleich sein, weil die gleiche Anziehungskraft auf beide wirkt. Nun sind aber die Wege verschieden, also wohnt offenbar den beiden Gewichten noch etwas Besonderes inne, das für jedes verschieden ist, und dies tritt in der Tat zu Tage, wenn man die Fähigkeit beider Gewichte, nach außen hin Arbeit zu leisten, abwägt. Stellen wir dem herabgleitenden Gewicht eine Feder entgegen, deren Kraft gerade hinreicht, es in seinem Lauf aufzuhalten, dann würde diese nicht genügen, um auch das andere Gewicht auf seinem langsameren Laufe nach oben aufzuhalten. Um zu finden, wieviel größer die entgegenzustellende Kraft sein muß, brauchen wir nur das an der kleineren Rolle hängende Gewicht zu vergrößern, bis es eben wieder dem anderen die Wage halten kann. Wir werden dann finden, daß ein zehnmal so schweres Gewicht dazu nötig ist, wenn die eine Rolle zehnmal kleiner ist als die andere. Das kleinere, an

der größeren Rolle befestigte Gewicht ist also im stande, eine im selben Verhältnis größere Last zu heben. Die Arbeitsleistung einer solchen **einfachen Maschine** ist gleich der Masse, auf welche eine an sich konstante Kraft wirkt, multipliziert mit dem Wege, den diese Kraft jener Masse zurückzulegen gestattet. Wir nennen die Arbeit E, die Masse m und den zurückgelegten Weg s und haben immer $E = ms$. Nach dem im vorigen Abschnitt Gesagten wird jedes Massenteilchen in gleicher Weise von der Anziehungskraft beeinflußt, so daß diese Massenteilchen eigentlich nur die Krafteinheiten zählen, die hier wirken, und man kann deshalb für die Masse einfach die Kraft selber setzen. Sollten wir im folgenden finden, daß irgend eine andere Kraft als die der Gravitation in den Äußerungen ihrer Arbeitsleistungen dieser Formel genügt, so wäre damit bewiesen, daß sie auf die betreffende Masse eine prinzipiell gleiche Wirkung ausübt wie die Schwerkraft.



Gewicht bei Rollen verschiedener Durchmesser. Vgl. Text, S. 74.

Wir können unsere vorhin angewandte „einfache Maschine“ noch weiter vereinfachen: von den Halbmessern der beiden Rollen greifen wir nur je einen heraus und stellen beide in eine gerade Linie. Auch die Schnur lassen wir fort und befestigen die Gewichte direkt an den Enden der beiden Halbmesser, dann haben wir ein Werkzeug vor uns, welches man einen **Hebel** nennt (s. die untenstehende Abbildung). Nach dem Vorangehenden sehen wir ohne weiteres ein, daß derselbe im Gleichgewichte sein muß, wenn der eine Arm um ebensoviel mehr belastet wird, als der andere länger ist. Ist die Länge des einen Armes A, die des anderen $l$mal größer, ferner das an dem größeren Arme hängende Gewicht G, so muß man an den kleineren Arm ein Gewicht lG hängen, um das Gleichgewicht herzustellen. Es ist eben $AlG = lAG$. Wir können nun die von der Schwerkraft ausgeübte Zugkraft durch eine beliebige andere ersetzen, z. B. durch die Kraft unserer Muskeln, wie wir es bei Anwendung der Brechstange tun (s. die Abbildung, S. 76). Ihr Auflagepunkt, der Drehungspunkt dieses Hebels, liegt immer sehr viel weiter von dem Ende entfernt, welches wir durch unsere Muskelkraft oder durch das Gewicht unseres Körpers belasten, als von dem Angriffspunkte bei dem Gegenstande, der erbrochen werden soll. Unsere Körperkraft wird dadurch um ein Vielfaches in ihrer Wirkung erhöht.



Hebel.

Ganz ebenso beruht auf dem Prinzip des Hebels die Anwendung der sogenannten **Schnellwagen** mit einem Schiebegewicht (s. die Abbildung, S. 77). Ein und dasselbe Gewicht hält hier sehr verschiedenen Lasten die Wage, je nachdem es an verschieden langen Hebelarmen aufgehängt wird, und die auf einer Teilung des Wagebalkens abzulesende Länge desselben gibt alsdann unmittelbar das Gewicht der auf dem anderen, unveränderlich langen Arm angehängten Last.

Die Anwendungen des Hebels sind überhaupt so mannigfaltige, daß man ihnen auf Schritt und Tritt begegnet und sich ihrer unausgesetzt bedient. Jede Türklinke ist ein Hebel, jede Kurbel, die wir drehen, arbeitet den Hebelgesetzen entsprechend, sogenannte einarmige Hebel sind die Brotschneidemaschinen und der Nußknacker; in der Maschinenbaukunst wird der Hebel in den verschiedensten Formen benutzt, auch die Zahnräder in unseren Taschenuhren wirken als Hebel. Der Knabe, welcher sich auf einem Brett allein schaukelt, bedient sich der Hebelgesetze, indem er das Gewicht des leeren Brettes an dem längeren Hebelarme als Gegengewicht benutzt (s. die Abbildung, S. 78).

Dasselbe Prinzip kommt in lehrreicher Form zur Anwendung bei einem Werkzeuge, welches mit dem Hebel keine äußere Ähnlichkeit mehr zeigt, bei dem sogenannten Flaschenzuge. Ein Seil ist hier über eine gerade Anzahl von Rollen gezogen, von denen die eine Hälfte fest ist, während an die andere eine Last gehängt werden kann. Wir können wohl die Konstruktion des



Hebelkraft. Vgl. Text, S. 75.

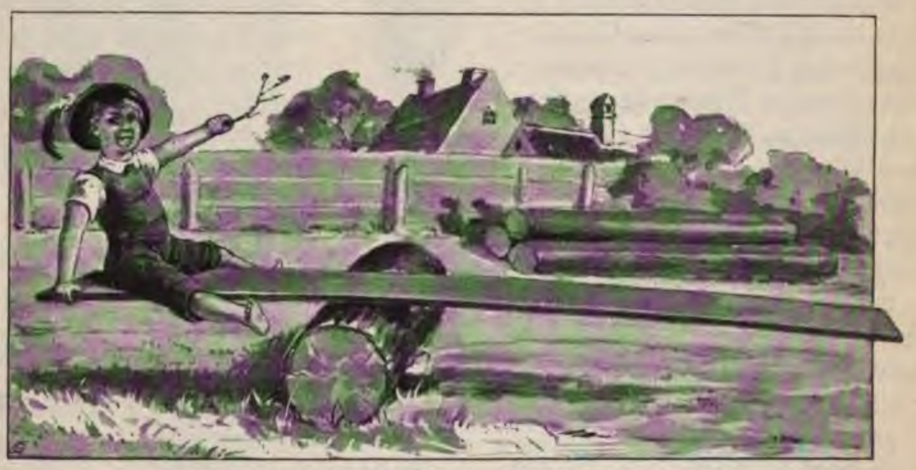
Werkzeuges im Speziellen als bekannt annehmen. Ohne weiteres ist ersichtlich, daß, um den beweglichen Rollenteil um eine bestimmte Strecke emporzuheben, wir das freie Ende des Seiles um ebensoviel mehr herabzuziehen haben, als der Zug Rollen besitzt, denn um so viel wird die Länge des ganzes Seiles vergrößert. Wir haben die Arbeit, welche unsere Muskeln in der Zeiteinheit zu leisten haben, um den gleichen Betrag verringert, können also mit der gleichen Anstrengung eine um ebensoviel größere Last heben. Freilich gebrauchen wir dazu nun eine entsprechend längere Zeit. Die gesamte Anstrengung, d. h. Arbeitsleistung, um die Last zu heben, bleibt also doch immer wieder dieselbe. Um ihren vollständigen mathematischen Ausdruck

zu erhalten, multiplizieren wir die vorhin gefundene Summe der wirkenden Krafteinheiten mk noch mit den Zeiteinheiten t und haben also für die Gesamtarbeitsleistung die Formel E = mkt oder E : t = mk. Handelt es sich um eine von der Schwerkraft geleistete Arbeit, so bemißt die Masse an sich schon die Krafteinheiten; k wird gleich 1 und kann fortgelassen werden. Ist uns nun die Aufgabe gestellt, mit Hilfe unserer Muskelkräfte eine bestimmte Arbeit zu leisten, ein Gewicht bis zu einer bestimmten Höhe zu heben, so ist die Größe unserer Muskelkraft k, die Masse des zu hebenden Körpers m und die geforderte Arbeitsleistung, in diesem Falle die Hubhöhe, gegeben. Häufig tritt dann der Fall ein, daß die Konstante mk zu groß wird, daß mit anderen Worten die Masse m zu bedeutend ist, um direkt von uns gehoben werden zu können. Jene einfachen Maschinen, wie der Flaschenzug, gestatten uns dann, die zu verwendende Zeit t zu variieren und so die linke Seite unserer Gleichung durch Division mit dieser Zeit beliebig kleiner zu machen. Diese Maschinen setzen uns also in den Stand, mit unseren schwachen Muskelkräften beliebig große Lasten in jede Höhe zu heben (s. die Abbildung, S. 79). Auf ähnlichen Veränderungen von Faktoren der obigen Gleichung beruhen Konstruktion und Wirkungsweise auch der übrigen Maschinen. Kommt es uns etwa auf Schnelligkeit für die Vollendung einer Arbeit an, wie meistens in unserer hastenden Zeit, so muß t möglichst klein werden; der Wert der linken Seite unserer Gleichung wächst im gleichen Maße. Bei gegebener rechts stehender Masse, an welcher die Arbeit geleistet werden soll, bleibt nichts anderes übrig, als k, die Kraft, zu vergrößern. Andere Naturkräfte als die unserer Muskeln treten ein; es entstehen die Dampfmaschinen u. s. w. Wieder in anderen Fällen kommt es uns nur auf die Erzeugung einer möglichst schnellen Bewegung, nicht aber auf die Hebung einer Last an; dann wird also das m veränderlich; wir haben darauf zu sehen, unsere Maschine möglichst zu entlasten, wenn wir die beste Wirkung von ihr erzielen wollen.

Schnellwage. Vgl. Text, S. 75.

Sehr selten aber, ja streng genommen niemals, wird man es in dem Spiel der Naturerscheinungen oder auch in den sorgfältigst zubereiteten Laboratoriumsversuchen mit nur einer Kraft zu tun haben. Immer werden mehrere Kräfte zusammenwirken, die unsere Aufgaben fördern oder stören. Bei unserem ersten Experimente mit den über eine Rolle gehängten gleichen Gewichten war schon die Schwerkraft in zwei getrennt wirkende Teilkräfte zerlegt, von denen die eine durch die Schnur eine umgekehrte Richtung gewann wie die andere, so daß sie sich gegenseitig aufheben mußten. Der Fall lag hier nur deshalb so unmittelbar übersichtlich, weil die Richtungen dieser einander entgegengesetzten Kräfte einander parallel waren. Nicht immer liegen die Dinge so einfach; es ist daher von fundamentaler Wichtigkeit, die Gesamtwirkung eines Spieles von Kräften wenigstens im Geist in die jeder einzelnen Kraft zukommenden Teile zu zerlegen, oder anderseits die Gesamtwirkung einzelner gegebener Kräfte ohne weiteres angeben zu können.

Wir nehmen zu dem Zwecke zwei Rollen und hängen darüber wieder eine Schnur, zunächst mit einem Gewicht an jedem Ende (s. die Abbildung, S. 80). Sind beide Gewichte gleich, so wissen wir, daß alles in Ruhe bleiben muß. Enthält dagegen das eine drei Gewichtseinheiten und das andere vier, dann wird dieses das erstere mit der Kraft $4 - 3 = 1$ emporziehen. Nun wollen wir aber zwischen den Rollen noch ein drittes Gewicht an dem Faden befestigen, das schwerer ist als die Differenz der beiden anderen, aber leichter als ihre Summe; nehmen wir also fünf Gewichtseinheiten für dasselbe. Die drei Gewichte seien einfach mit 3, 4 und 5 bezeichnet. 5 zieht infolge seiner größeren Schwere die beiden anderen Gewichte empor und knickt den Faden zwischen den beiden Rollen deshalb ein. Die Gewichte, oder sagen wir gleich die Kräfte 3 und 4, wirken durch Übertragung mittels des schräg verlaufenden Fadens auf die Kraft 5 auch in schräger Richtung. Wir beobachten nun, daß Gleichgewicht eintritt, also



Die Anwendung des Hebels in der Schaukel. Vgl. Text, S. 76.

in einer bestimmten Stellung alles zur Ruhe kommt. Die vereinte Wirkung von 3 und 4, die doch zusammen mehr als 5 ausmachen, sind also dennoch nicht im stande, dieses Gewicht dauernd weiter emporzuheben, wie sie es tun würden, wenn ihre Kräfte parallel und entgegengesetzt zu 5 wirkten. Dadurch, daß sie in diesem Falle schräg angreifen müssen, geht scheinbar von jeder dieser beiden Kräfte etwas verloren. Der Verlust bemißt sich derart, daß die Summe der beiden reduzierten Kräfte, die auf die Verbindungsstelle der drei Fädenteile in 0 wirken, gleich der Kraft 5 ist, die senkrecht angreift, sonst könnte ja das Gleichgewicht nicht eintreten. In der Richtung der schrägen Fäden wirken jedoch offenbar die Kräfte ungeschwächt, denn es kann ja in Wirklichkeit nichts von ihnen verloren gehen und jedes Gewicht zieht mit der ihm entsprechenden Kraft an dem Faden. Eine Abbildung dieser Kräfte können wir uns durch die Weglängen verschaffen, um welche sie in der Zeiteinheit eine Masseneinheit weiter bewegen würden, die unter dem Einflusse keiner anderen Kraft steht. Wir tun dies, indem wir auf dem nach 3 hinführenden Faden 3 Maßeinheiten abstecken und auf dem nach 4 hinführenden deren 4. Das **Gesetz vom Parallelogramm der Kräfte**, dem wir hier begegnen, sagt nun, daß **die Diagonale eines Parallelogramms, welches man mit jenen beiden Seitenlängen über den beiden Richtungen der ihnen entsprechenden Kräfte errichten kann, genau das Maß und die Richtung derjenigen Kraftwirkung hat, die aus den beiden**

vereinten Kräften entsteht. In unserem Falle muß also die Diagonale eine senkrechte Richtung haben, weil ja 5 senkrecht angreift, und 5 Einheiten lang sein. Bei den gewählten Zahlenverhältnissen ist die Summe der Quadrate der Seitenkräfte zufällig gleich dem Quadrat der resultierenden Kraft ($3^2 + 4^2 = 5^2$), zufolge des pythagoreischen Lehrsatzes sind die beiden durch die Diagonale aus dem Parallelogramm gebildeten Dreiecke rechtwinkelige, das Parallelogramm selbst ein Rechteck, und die beiden schrägen Fäden stoßen im rechten Winkel zusammen. Es ist in diesem Falle leicht, diese theoretische Schlußfolgerung durch das Experiment zu prüfen. Der rechte Winkel wird sich in der Tat stets wieder einstellen, wie man auch die Bedingungen des Versuchs verändern mag, indem man z. B. die eine Rolle höher stellt als die andere, oder den Angriffspunkt der resultierenden Kraft an verschiedene Stellen zwischen die beiden Rollen legt. Nur das Verhältnis der drei Kräfte muß gleich 3:4:5 bleiben. Wird dieses Verhältnis anders gewählt, so wird auch der Winkel ein ganz bestimmter anderer, den man mit Hilfe des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte sofort konstruieren kann. Wählen wir das Gewicht zwischen den Rollen schwerer, so muß es den Faden offenbar mehr herunterziehen, der Winkel wird also ein spitzer. Nehmen wir einmal an, dieses Gewicht sei gleich 6 Einheiten, während die anderen 3 und 4 bleiben. Wir haben dann die vollkommen bestimmte geometrische Aufgabe zu lösen, aus den drei gegebenen Seiten 3, 4 und 6 ein Dreieck zu bilden und den der größten Seite gegenüberliegenden Winkel zu finden. In unserem Fall beträgt derselbe nach den Regeln der ebenen Trigonometrie gleich 117,3°. Die Ergänzung dieses Winkels zu 180° ist der gesuchte Winkel beim Angriffspunkte der drei Kräfte. Wir finden also 62,7° dafür. Das Experiment wird sich wieder in völliger Übereinstimmung mit der Theorie finden.

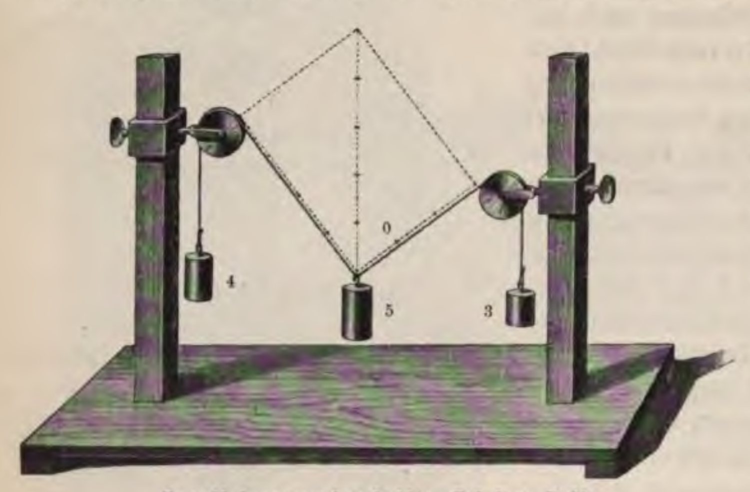


Flaschenzug. Vgl. Text, S. 77.

Haben wir nun hier oder in irgend welchen anderen Fällen bei unseren stets veränderten Versuchen immer innerhalb der Fehlergrenzen unserer Beobachtung völlige Übereinstimmung mit den Verhältnissen gefunden, die unter einer gewissen einfachen Voraussetzung berechnet

werden konnten, so nennt man jene Voraussetzung ein Gesetz. Wir können von ihm dann immer annehmen, daß es innerhalb endlicher, noch im Geist übersehbarer Grenzen unveränderte Anwendung findet und dürfen deshalb nach Ermittelung solcher Gesetze durch Rechnung oder Konstruktion auch sofort angeben, was unter der Voraussetzung gewisser extremer Fälle geschehen würde, auch ohne das Experiment selbst zu machen. Da solches bei physikalischen Untersuchungen häufig geschieht, wollen wir es an unserem einfachen Beispiel der drei Gewichte erläutern.

Fragen wir uns zunächst, was geschehen würde, wenn wir das eine Gewicht beliebig vergrößerten. Die Theorie wird uns dann sofort angeben, daß dies von einer leicht bestimmbaren Grenze an nicht mehr angeht, wenn die Bedingung des Gleichgewichts aufrecht erhalten bleiben soll. Würden wir das mittlere Gewicht gleich der Summe der beiden anderen machen, also 3:4:7, so läßt sich mit diesen Seiten kein Dreieck mehr konstruieren, oder streng genommen, es tritt der extreme Fall ein, daß der der größten Seite gegenüberliegende Winkel gleich zwei rechten wird. Der Winkel am Angriffspunkt der drei Kräfte wird also gleich Null und die nach den drei Gewichten hinführenden Fäden müssen einander parallel sein. Dann ist es selbstverständlich, daß die Gewichte 3 und 4, die gemeinsam aus gleicher Richtung angreifen, dem Gewichte 7 genau so die Wage halten, wie es in unserem ersten und einfachsten Beispiel auf S. 73 geschildert ist. Die geringste einseitige Gewichtshinzufügung stört nun aber dauernd das Gleichgewicht, der Faden rollt nach der betreffenden Seite ab.

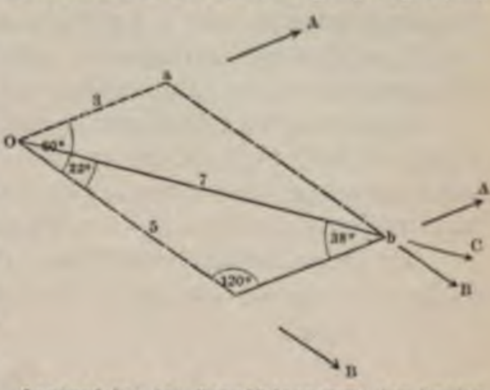


Parallelogramm der Kräfte. Vgl. Text, S. 78.

Die gleichen geometrischen Verhältnisse treten offenbar auch ein, wenn das mittlere Gewicht gleich der Differenz der beiden anderen wird, denn auch in diesem Falle sind zwei Seiten des verlangten Dreiecks gleich der dritten. Es findet also ein anderer Grenzzustand für das Gleichgewicht statt, wenn man in unserem Falle das Gewicht 1 an den Faden zwischen den beiden Rollen hängt. Da man mit den Werten 3, 4 und 1 kein Dreieck bilden kann, so kann auch durch das Gewicht 1 keine Einbiegung des Fadens eintreten, was auf den ersten Blick einigermaßen merkwürdig erscheint. Dagegen verhindert dieses Gewicht 1, daß eine Bewegung des ganzen Systems stattfindet, da ja gerade noch das Gleichgewicht vorhanden ist, während sich natürlich der Faden sofort nach der Seite des Gewichts 4 bewegen muß, wenn das Gewicht 1 zwischen den Rollen fortgenommen wird.

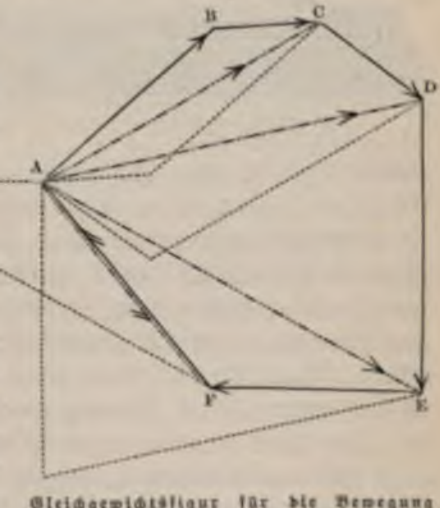
Unsere Versuche mit Gleichgewichtszuständen hatten hier den Vorteil, daß die eintretenden Verhältnisse dabei leicht festzustellen sind, weil sie verharren. Aber das Gesetz vom Parallelogramm der Kräfte hat ebenso für andauernde Bewegungszustände Gültigkeit (s. die obere Abbildung, S. 81). Setzen wir den Fall, zwei Sonnen wirkten aus sehr beträchtlicher Entfernung (die

deshalb gewählt wird, damit für unsere Betrachtungen die Anziehungswirkungen beider Körper wegen der unverändert anzunehmenden Entfernung konstant bleibt) auf einen Körper, so daß die Richtungen der beiden Anziehungskräfte bei dem Körper den Winkel 60° bilden. Die beiden Kräfte selbst mögen sich wie 3:5 verhalten. Dann wird der Körper, in Freiheit gelassen, weder der einen noch der anderen Sonne entgegenfliegen, sondern eine Richtung zwischen beiden einschlagen, die mit Hilfe unseres Parallelogramms der Kräfte sofort angegeben werden kann. Wir haben zu dem Zweck wieder nur ein Dreieck zu konstruieren, in welchem zwei Seiten die Längen 3 und 5 haben, und der von diesen eingeschlossene Winkel 180° — 60° = 120° mißt. Die beiden anderen Winkel werden dann rund 22° und 38° und die dritte Seite, also die Diagonale des Parallelogramms, gleich 7. Unser Körper wendet sich also der kräftigeren Sonne mehr zu, seine Richtung weicht um 22° von der zu ihr führenden geraden Linie ab. Die Geschwindigkeit, mit der er in dieser Richtung in den leeren Raum hinausfliegt, ist um eine Einheit geringer, als wenn sie von der Summe der Kräfte der beiden Sonnen erzeugt werden würde, die in schräger Richtung seine Bewegung beeinflussen, beträgt demnach 7 der gewählten Einheiten. Der Körper verhält sich genau so, als ob statt der zwei Sonnen mit den Anziehungskräften 3 und 5 nur eine mit der Kraft 7 in der angegebenen Richtung zwischen beiden vorhanden wäre.



Konstruktion des Parallelogramms der Kräfte.

Nach einiger Überlegung sieht man auch ohne die Erfahrung mit den drei Gewichten, daß dieses Resultat eintreten muß. Nennen wir die beiden wirklich vorhandenen Sonnen A und B. A allein bewegt den Körper in jeder Sekunde um drei Einheiten in ihrer Richtung. An dem Resultate kann nun offenbar nichts geändert werden, wenn wir einmal annehmen, die Wirkung fände ruckweise statt, so daß der Körper in der ersten Sekunde um sechs Einheiten, in der zweiten gar nicht weiterginge, in der dritten dagegen wieder sechs u. s. f. Ebenso wirke die zweite Sonne B, nur daß sie in der ersten Sekunde pausieren und in der zweiten den Körper um zehn Einheiten zu sich heranziehen möge. Dann bewegt sich der Körper in der ersten Sekunde von O nach a, in der zweiten wird er von A nicht beeinflußt; unter der Anziehungskraft von B bewegt er sich von a nach b. (Die Sonnen sind unendlich weit entfernt gedacht, weshalb die Parallele zu OB durch b immer noch zu B hinführt, was auf einer Zeichnung nicht unmittelbar anschaulich gemacht werden kann.) Nach Ablauf von zwei

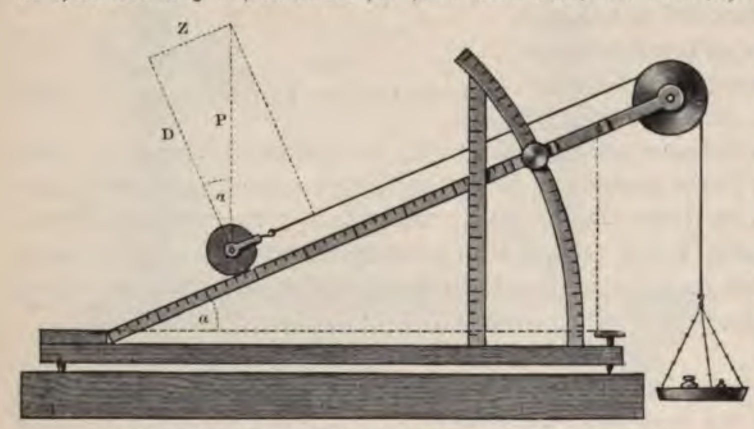


Gleichgewichtsfigur für die Bewegung eines von mehreren Kräften angegriffenen Körpers. Vgl. Text, S. 82.

Sekunden befindet sich der Körper also wirklich an dem Punkte, wohin ihn die Diagonale des aus den beiden Einzelstrecken zu konstruierenden Parallelogramms geführt hätte, und so muß das Spiel der beiden Kräfte sich in den nächsten und allen folgenden Doppelsekunden fortsetzen. Es ist hier durchaus nur beiläufig zu erwähnen und für die Beweiskraft obiger Betrachtungen keineswegs notwendig, daß in der Tat nach neueren Anschauungen über die Wirkungsweise aller Naturkräfte diese intermittierende, nacheinander eingreifende stoßweise Tätigkeit der letzten Bewegungselemente die der Wirklichkeit entsprechende zu sein scheint.

Unser Körper bewegt sich unter dem Einfluß der beiden Sonnen A und B genau so, als befände sich in C eine dritte, mit der Kraft 7 begabte. Eine wirkliche ebenso starke Sonne, in genau entgegengesetzter Richtung aufgestellt (—C), muß alsdann die Wirkung der beiden anderen vollkommen aufheben: der Körper bewegt sich überhaupt nicht, er ist im Gleichgewichte.

Wir können auf die eben beschriebene Weise offenbar so viele Kräfte, als es uns beliebt, in ihrer Wirkung auf einen Körper summieren oder, wie man sich auszudrücken pflegt, die Resultierende aus allen diesen Kräften finden; wir brauchen ja nur zunächst aus zweien derselben die Resultierende zu ermitteln, dann die Wirkung der dritten Kraft auf diese Resultierende u. s. f. Konstruktiv ist dies mit Anwendung unserer Arbeitshypothese von den stoßweisen Wirkungen ungemein leicht (s. die untere Figur, S. 81). Wir tragen zu diesem Zweck die erste Kraft nach ihrer Richtung und Größe als Linie auf, setzen an das Ende derselben die repräsentierende Linie der zweiten Kraft in der ihr entsprechenden Richtung an, dann die dritte wieder an diese u. s. f. Es entsteht auf diese Weise ein Polygon ABCDEF. Kehren seine Linien wieder auf den Ausgangspunkt zurück, ist es also eine geschlossene Figur, so wird eben auch der Körper nach der Einwirkung aller Kräfte auf seinen Ausgangspunkt zurückgeführt, oder die Kräfte halten ihn im Gleichgewicht. Bleibt aber die Figur offen, so gibt die gerade Linie, durch welche sie geschlossen werden kann, z. B. FA in unserer Figur, Richtung und Größe der aus allen Kräften resultierenden Wirkung an. Das Vieleck nennt man dann die Gleichgewichtsfigur für die Bewegung des Körpers.



Zerlegung der Kräfte in der schiefen Ebene. Vgl. Text, S. 83.

Nicht nur die Lösung der Aufgabe, wie eine Summe von Kräften auf einen Körper wirkt, ist für die Klarstellung sehr vieler physikalischer Vorgänge und für die praktische Anwendung bei den verschiedenartigsten Baukonstruktionen von großer Wichtigkeit, sondern es ist auch umgekehrt sehr oft nötig, eine vorhandene Kraft nach gegebenen Voraussetzungen so in zwei oder mehrere Teile zu trennen, als ob verschiedene Kräfte auf den betreffenden Körper wirkten, man sagt dann, daß man die Kraft in Komponenten zerlegt. Dieser Fall tritt in der Praxis namentlich deswegen häufig ein, weil bestimmte Teile einer Kraft oft infolge einer sehr viel größeren Gegenwirkung für uns vollständig verschwinden, so daß nur der andere Teil für uns

in Rechnung kommt. Rollt z. B. ein Wagen eine **schiefe Ebene** hinab, so kommt es uns zwar so vor, als ob hierbei eine in der Richtung jener Ebene wirkende Kraft den Wagen zöge, während in Wirklichkeit hier doch nur ein Teil der ursprünglich nur nach unten ziehenden Schwerkraft wirkt, die aber für die Ausübung dieses senkrechten Zuges einen unüberwindlichen Widerstand auf der Grenzfläche der schiefen Ebene findet. Es ist nun nach dem Vorangegangenen sehr leicht zu bestimmen, was in diesem Falle geschehen muß. Wenn zwei wirklich vorhandene Kräfte sich zu einer Parallelogrammdiagonale verschmelzen lassen, wenn, um auf ein früheres Beispiel zurückzukommen, zwei Sonnen so wirken wie eine berechnete dritte zwischen ihnen, so können wir offenbar auch umgekehrt zwei oder beliebig viele Sonnen nach ihrer Kraft und Stellung errechnen, die zusammen zufolge des Parallelogramms der Kräfte dieselbe Wirkung üben müßten wie jene einzelne. In unserem Beispiele von den drei Sonnen A, B und —C (S. 81 u. 82), die sich in Bezug auf den Körper O gegenseitig das Gleichgewicht halten, könnte man offenbar —C in zwei Sonnen A′ und B′ zerlegen, so daß A′ genau von derselben Kraft wie A und in Bezug auf O ihr gerade gegenüberliegend gedacht wird, während auch von B′ und B dasselbe gilt. Es ist dann unmittelbar klar, daß Gleichgewicht herrschen muß. Man nennt in diesem Falle A′ und A sowie B′ und B **Kräftepaare**.



Galileis Fallrinne. Vgl. Text, S. 84.

In unserem Falle der schiefen Ebene verschwindet nun für die Bewegung des Wagens der Teil der Schwerkraft, mit welchem er gegen die Ebene drückt. Wir müssen also, um den anderen Teil zu finden, die Schwere P des Wagens, mit der er eine Wagschale herabziehen würde, in zwei Komponenten zerlegen, von denen die eine, jener ausgeübte Druck D, senkrecht zur schiefen Ebene steht, die andere, Z, der gesuchte Zug, parallel zur Ebene liegt. Die Kraft P ist also die Diagonale eines Rechtecks mit den Seiten D und Z und die Gleichgewichtsfigur ein rechtwinkeliges Dreieck mit diesen drei Seiten P, D und Z. Ist der Winkel, welchen die Ebene mit der Horizontalen macht, α, so sieht man sofort (s. die Abbildung, S. 82), daß $Z = P \sin \alpha$, und $D = P \cos \alpha$ sein muß. Wir können uns durch das Experiment leicht von der Richtigkeit dieser Behauptung überzeugen, wenn wir an den Wagen ein Seil befestigen, dieses am höchsten Punkte der schiefen Ebene über eine Rolle leiten und nun an das andere Ende des Seiles Gewichte hängen, die dem Zuge des Wagens gerade das Gleichgewicht halten. Diese müssen, abgesehen von dem Verluste durch Reibung, die hier außer acht bleiben kann, gleich dem Werte von Z sein. Ist z. B. der Winkel gleich 30°, also sein Sinus gleich $^1/_2$, und beträgt das Gewicht des Wagens 10 kg, so brauchen wir an das andere Ende des Seiles nur 5 kg zu hängen, um den Wagen zum Stillstehen zu bringen.

Nach dem Vorangegangenen wird man in jedem gegebenen Falle leicht eine Kraft in beliebig gerichtete Komponenten zerlegen können.

Die schiefe Ebene wurde von **Galilei** zuerst benutzt, um die Fallgesetze bequemer studieren zu können, als es mit einem frei fallenden Körper möglich ist. Er konstruierte eine Fallrinne,



wie Abbildung S. 83 zeigt, die man in ihrem einen Teile zu einer schiefen Ebene von bestimmtem Winkel machen kann, während der andere Teil horizontal bleibt. Von der schiefen Ebene ließ er eine Kugel herabrollen und ihren Weg in dem horizontalen Teile der Rinne fortsetzen. Die Geschwindigkeit, mit der die Kugel über die schiefe Ebene zu rollen beginnt, bemißt sich offenbar nach der eben ermittelten Kraft des Zuges. Wir können sie also gegen die Geschwindigkeit beim freien Fall durch Verkleinerung des Winkels a beliebig verlangsamen. Die Beschleunigung der Schwere muß dabei aber demselben Gesetze folgen wie beim freien Fall. Je höher der Punkt der schiefen Ebene liegt, von dem man die Kugel ihren Lauf beginnen läßt, mit um so größerer Geschwindigkeit muß dieselbe auf ihrem tiefsten Punkt ankommen, und setzt nun vermöge des Prinzips der Trägheit diese Geschwindigkeit unverändert in dem horizontalen Teile der Rinne fort, wo man sie leicht messen kann, wenn man die letztere an der Seite mit einem Maßstabe versieht. Durch Experimente mit diesem einfachen Instrument kann man alle Fallgesetze bestätigt finden und auch aus ihnen einen leidlich guten Wert für die Gravitationskonstante g ableiten, wenn man den Winkel der schiefen Ebene kennt. Ist dieser z. B. gleich 3^0, so werden wir finden, daß die Kugel in dem horizontalen Teile der Rinne etwa $1/2$ m pro Sekunde zurücklegt, wenn sie von der schiefen Ebene $1/4$ m vom Knickpunkte entfernt losgelassen wurde. Der Fallraum in der ersten Sekunde war also 0,25 m, die Geschwindigkeit am Ende derselben noch einmal so groß, was der Theorie entspricht (S. 55). Wir finden aus diesen Resultaten der Beobachtung $g = 0{,}5 : \sin 3^0$. Dieser Sinus ist ungefähr gleich $\frac{1}{19}$; wir erhalten demnach $g = 19 : 2 = 9{,}5$ m in roher Annäherung richtig. Mit demselben Apparate können wir die quadratische Zunahme der Geschwindigkeit mit der Zeit, die Unabhängigkeit des Fallraums von dem Gewichte des Körpers, resp. seiner Masse u. s. w. zeigen.

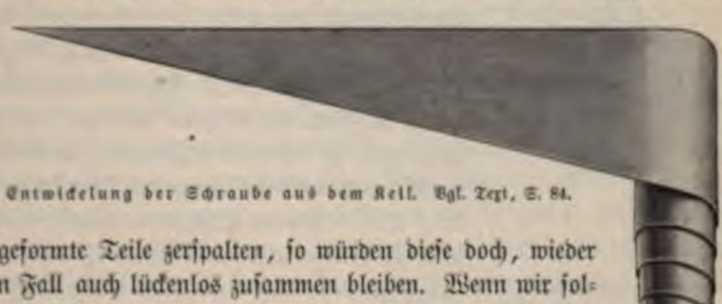
Eine tausendfältige Anwendung findet das Prinzip der schiefen Ebene in der Technik wie im täglichen Leben auch in ihrer Form als **Keil** und als **Schraube**. Die Theorie derselben läßt sich aus dem Vorangehenden leicht ableiten. Die beigegebenen Figuren mögen dies erleichtern. Sehr deutlich ist zu erkennen, wie die Schraube sich aus dem Keil durch dessen Drehung entwickelt (s. die Abbildung, S. 85).

In allen vorangegangenen Betrachtungen haben wir den durch eine Kraft bewegten Körper stillschweigend als einen Punkt gedacht. Denn wenn wir von einer Kraft redeten, die ein Gewicht herabzieht, so kann diese Kraft doch auch nur einen Punkt des Gewichts angreifen; oder, wenn dieselbe Kraft auf alle Teile des Gewichts wirkt, die alle herabgezogen werden müssen, da sie miteinander fest verbunden sind, so frägt es sich doch nun, wie die Kraft sich in dem Körper zu verteilen hat, um die beobachtete Wirkung auszuüben, beziehungsweise, welche Wirkung umgekehrt eintreten muß, wenn eine oder mehrere Kräfte auf Körper von bestimmter Masse und Größe wirken, und wie sich die Gesamtbewegung der untereinander fest verbundenen Teile desselben darstellen

Projektion der Schraube als schiefe Ebene.

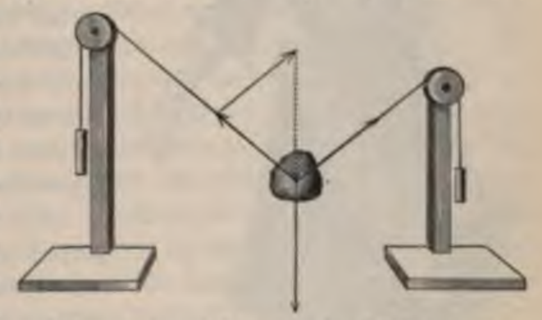
wird. Dies ist ja die eigentliche Aufgabe der Physik in unserem Sinne. Sie soll sich mit dem Vorhandenen, nicht mit Abstraktionen befassen, die nur in unserem Geiste vorhanden sind, wie eben jene körperlosen Punkte, die doch wieder Körper sein müssen, damit man ihre Bewegungen beobachten und daraus die Wirkungsweise von Kräften ableiten kann.

In Bezug auf die Schwerkraft lagen die Dinge, wenigstens auf der Oberfläche der Erde, glücklicherweise sehr einfach. Da die Schwerkraft jedes einzelne Teilchen eines beliebig geformten Körpers genau wie jedes andere beeinflußt, so muß auch der dadurch beschriebene Weg jedes einzelnen Teilchens genau derselbe sein wie der jedes anderen. Man könnte also einen Körper in beliebig geformte Teile zerspalten, so würden diese doch, wieder zusammengelegt, im freien Fall auch lückenlos zusammen bleiben. Wenn wir solches im allgemeinen nicht beobachten, so liegt dies nur am Luftwiderstande, der einerseits spezifisch schwerere Körper weniger stört, anderseits dieselben so zu drehen sucht, daß die den geringsten Widerstand bietende Fläche im Fall vorangeht.


Entwickelung der Schraube aus dem Keil. Vgl. Text, S. 84.

In der Praxis werden wir es immer nur mit einer Summe von Kräften zu tun haben, die zugleich auf einen irgendwie ausgedehnten Körper wirken. Wollen wir ihre Größe messen, so müssen wir ein möglichst einfaches Mittel zur Summierung aller dieser Kräfte zu finden trachten. Dieses einfache Mittel bieten die Erscheinungen des Gleichgewichts, von denen wir bereits einige studiert haben, ohne jedoch dabei auf die Form der Körper Rücksicht zu nehmen. Das werden wir nun nachholen, nachdem wir von den allgemeinen Regeln der Kräftewirkung das Notwendigste erfahren haben.

Wir hängen einen beliebig geformten Körper an einem Faden über einer Rolle auf und lassen auf der anderen Seite des Fadens ein Gewicht von bekannter Größe wirken, dann tritt Gleichgewicht ein, wenn unser Körper genau ebenso schwer ist wie jenes Gewicht. Das bedeutet für uns so viel, daß die Summe aller Anziehungskräfte, welche die Erde auf alle Teile des Körpers ausübt, gleich und entgegengesetzt ist einer einzigen Kraft, die in dem Punkt angreift, wo der Körper an dem Faden aufgehängt ist, und diese Kraft bemessen wir nach der Größe des auf der anderen Seite ziehenden Gewichtes. Wir haben damit also eine Summation aller auf den Körper wirkenden Kräfte in der Tat ausgeführt. Es zeigt sich nun bei diesem Experimente, daß es durchaus nicht gleichgültig ist, wo wir die einheitlich wirkende Gegenkraft angreifen lassen. Je nach der Stelle, an der wir den Faden an dem unregelmäßig geformten Körper befestigen, nimmt derselbe, frei hängend, eine andere Gleichgewichtslage an. Befindet er sich in einer solchen in Ruhe, so könnten wir offenbar an einem beliebigen, in dem Körper längs der verlängerten Fadenrichtung gelegenen Punkt ein Gewicht von der Größe des am anderen Ende des


Schwerelinie und Schwerpunkt. Vgl. Text, S. 86.

Fadens hängenden, an Stelle des Körpers anbringen, ohne das Gleichgewicht zu stören, d. h. wir können uns die Masse des unregelmäßigen Körpers, die ja nur ein anderer Ausdruck für die Summe der auf ihn wirkenden Schwerkräfte ist (s. Seite 67), in irgend einem Punkte längs dieser Linie vereinigt denken, ohne an der Wirkung der Schwerkraft auf den Körper etwas zu ändern. Da wir diese Linie, wie wir sahen, leicht durch das Experiment finden können, so erreichen wir hierdurch einen wesentlichen Vorsprung für unser weiteres Studium.



Schwerpunkt außerhalb der Drehungsachse. Vgl. Text, S. 87.

Die nach oben ziehende einzelne Kraft des Fadens ersetzen wir durch zwei verschiedene Kräfte, indem wir zwei Fäden an zwei verschiedenen Punkten des Körpers befestigen, jeden über eine Rolle führen und durch ein Gewicht beschweren; in diesem Falle kann das Gleichgewicht nur durch Erfüllung des Parallelogrammgesetzes erhalten bleiben. Dieses ist aber leicht anzuwenden, nachdem wir es nur noch mit jener **Schwerelinie** des Körpers (s. die untere Abbildung, S. 85) zu tun haben, in welcher wir seine ganze Kraft scheinbar vereinigt finden. Unsere Aufgabe wird genau dieselbe wie die auf Seite 80 behandelte mit den drei Gewichten. Die Gleichgewichtsfigur aus den drei, die Kräfte repräsentierenden Linien muß ein geschlossenes Dreieck bilden. Dies ist aber nur möglich, wenn die drei Richtungen sich irgendwo in einem Punkte treffen. Der Vergleich mit unseren früheren Betrachtungen über die Vereinigung von Kräften zu einer gemeinsamen Resultante wird uns jetzt für einen beliebig geformten Körper sagen, daß er im Gleichgewicht sein muß, wenn alle auf ihn wirkenden Kräfte auf einen einzigen Punkt zielen und sich zu einer geschlossenen Figur durch Parallelverschiebung vereinigen lassen. Diesen Punkt, in welchem alle Kräfte zusammentreffen müssen, nennen wir den **Mittelpunkt der Kräfte**. In ihm können wir alle diese Kräfte vereinigt denken. In Bezug auf die Wirkung der Schwerkraft nennen wir diesen Punkt den **Schwerpunkt**. Ein beliebig geformter Körper wird sich in Bezug auf die Anziehungskraft der Erde so verhalten müssen, als ob seine ganze Masse in seinem Schwerpunkte vereinigt wäre.

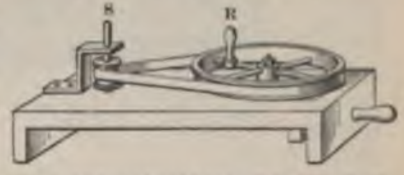


Das Gleichgewicht des menschlichen Körpers. Vgl. Text, S. 87.

Wir können nun den Schwerpunkt eines jeden Körpers zufolge jener Theorie sofort durch das Experiment finden. Er muß ja offenbar irgendwo auf der früher gefundenen Schwerelinie liegen. Markieren wir diese für zwei verschiedene Gleichgewichtslagen in dem Körper, so gibt der Schnittpunkt dieser beiden Linien die Lage des Schwerpunktes an.

Bei einem in seinem Schwerpunkt aufgehängten oder unterstützten Körper ist Gleichgewicht vorhanden, das man in diesem Fall ein indifferentes nennt. Auch wenn wir den Körper genau über oder unter dem Schwerpunkt unterstützen, bleibt er im Gleichgewicht. Lassen wir auf den Körper

einen Augenblick lang eine andere Kraft wirken, die ihn aus dem Gleichgewichte bringt, so wird er, über dem Schwerpunkt unterstützt, sofort wieder in die Gleichgewichtslage zurückkehren, sobald die neue Kraft aufhört zu wirken; im anderen Fall aber setzt der Körper die einmal begonnene Bewegung fort: er stürzt von seinem Stützpunkte herab. Die erste Art von Gleichgewicht nennen wir ein **stabiles**, die andere ein **labiles** Gleichgewicht. Die Erklärung für beide Zustände liegt auf der Hand. Wenn wir einen aufgehängten Körper aus seiner Gleichgewichtslage emporziehen, so daß er etwa die in unserer Figur punktierte Lage einnimmt, so wirkt die Schwere im Schwerpunkt unter einem Winkel mit der ihr gegenüber ungemein großen Kraft des fest aufgehängten Fadens (s. die obere Abbildung, S. 86). Es entsteht eine senkrechte Komponente zu der Richtung des Fadens, die den Körper in einem Kreise hinabtreibt. Da er die Gleichgewichtslage mit einer gewissen Geschwindigkeit erreicht, überschreitet er sie, und es tritt die früher näher untersuchte Pendelbewegung ein, die sich so lange fortsetzt, bis der Luftwiderstand die Bewegung aufgehoben und der Körper in seine Ruhelage zurückgekehrt ist. Dasselbe wird auch eintreten, wenn wir den Körper an irgend einem Punkte seiner Oberfläche direkt aufhängen, so daß er sich nur um diesen bewegen kann. Er wird dann die Schwingungsdauer eines Pendels von einer Länge besitzen, die der Entfernung des Aufhängungspunktes vom Schwerpunkte des Körpers entspricht, in welchem die Anziehungskraft der Erde so angreift, als ob der übrige Teil des Körpers gar nicht existierte.



Zentrifugalmaschine. Vgl. Text, S. 89.

Ganz anderes beobachten wir aber, wenn der Unterstützungspunkt tiefer liegt als der Schwerpunkt. Sobald dann der Körper nur um ein weniges aus der Gleichgewichtslage entfernt wird, greift die Anziehungskraft im Schwerpunkte mit einem Hebelarm an, der so lang ist wie die Entfernung des Stützpunktes vom Schwerpunkt, und zieht mit diesem den ganzen Körper herab. Ist der Stützpunkt mit ihm fest verbunden, so geht er unter demselben aus dem labilen in den stabilen Gleichgewichtszustand über.

Aus dem Vorhergehenden folgt auch, daß ein Körper nur so lange auf seiner Unterlage ruhen kann, als ein aus seinem Schwerpunkt gefälltes Lot noch die Unterlage trifft, denn selbst auf einer hier angebrachten Nadelspitze würde er wenigstens im labilen Gleichgewichte verharren. Sowie aber diese Lotlinie vom Schwerpunkt außerhalb des Körpers endigt, muß derselbe notwendig umkippen, da nun wieder ein Hebelarm vorhanden ist. Dies ist der Grund, weshalb ein Mann, der eine Last auf dem Rücken trägt, sich vorbeugen muß, um nicht nach hinten zurückzufallen und man sich bei einseitiger Belastung des Körpers nach der entgegengesetzten Seite biegt, oder anderseits, weshalb man sehr beträchtlich größere Lasten auf den Schultern tragen kann als auf dem Rücken, weil dabei kein Hebelarm angreift, dem durch die Muskelkraft entgegengewirkt werden muß (s. die untere Abbildung, S. 86).

Bei allen Konstruktionsarbeiten im Bau- wie im Maschinenfach spielt begreiflicherweise die Auffindung des Schwerpunktes der einzelnen mitwirkenden Teile der Konstruktion die allergrößte Rolle, um die Stabilität des Ganzen zu sichern. Wenn die verwendeten Körper von symmetrischer Gestalt sind und die Masse in ihnen gleichmäßig verteilt liegt, nennen wir sie „homogen“; es ist leicht, die Lage ihres Schwerpunktes zu berechnen, denn es wird für einen solchen Körper immer möglich sein, die Lage dreier Flächen zu finden, von denen jede ihn in zwei gleiche Hälften trennt. Diese Flächen müssen offenbar durch den Schwerpunkt gehen: ihr

Schnittpunkt gibt ihn an. Nach demselben Prinzip findet man auch den Schwerpunkt unsymmetrischer, aber homogener Körper.

Sehr häufig kommt es in der Praxis vor, daß ein Körper um eine Achse drehbar gemacht wird, dessen Verhalten der Schwerkraft gegenüber man zu studieren hat. Hierhin gehören auch die Probleme, welche sich mit den Erscheinungen der Achsendrehung von Weltkörpern befassen. Geht die Achse durch den Schwerpunkt selbst, so ist dieser ja durch jene unterstützt, und der Körper ist im Gleichgewicht. Dieses wird auch in jeder Lage, die der Körper bei einer Drehung um diese Achse einnehmen kann, erhalten bleiben; er kann weder pendeln noch stürzen, ist also im indifferenten Gleichgewicht. Eine drehende Bewegung, welche man dem Körper durch einmaligen Anstoß erteilt, müßte er bis in alle Ewigkeit beibehalten, wenn keine Reibungswiderstände die durch den Stoß ihm zugeführte Kraftsumme allmählich verzehren würden.



Experiment der Zentrifugalkraft mit verschiedenen Flüssigkeiten. Vgl. Text, S. 90.

Geht aber die Drehungsachse nicht durch den Schwerpunkt, so wird der Körper an dem entstandenen Hebelarme so lange gedreht werden, bis das durch den Schwerpunkt gehende Lot die Achse trifft, so daß er in ihr seinen Aufhängungspunkt findet, beziehungsweise, bei labilem Gleichgewichtszustand, seinen Stützpunkt.

Die Drehung eines Körpers um eine Achse nennt man seine Rotation. Rotierenden Körpern begegnen wir am Himmel und auf der Erde überall. Bei den Bewegungen dieser Art tritt nun zu den Wirkungen der Schwerkraft noch die einer anderen in die Erscheinung, die wir schon auf den Seiten 48 und 56 als Tangential- oder Zentrifugalkraft kennen gelernt haben. Bei den Bewegungen der Himmelskörper um den Schwerpunkt ihres Systems hält die Anziehungskraft der Zentrifugalkraft stets genau das Gleichgewicht. Der Ausdruck, welchen wir auf Seite 48 für die Anziehungskraft g eines Weltkörpers gefunden haben, ist zugleich, mit umgekehrtem Vorzeichen genommen, das Maß für die Zentrifugalkraft. Er lautete $g = \frac{4r\pi^2}{u^2}$. Da nun $\frac{2r\pi}{u}$ gleich der Bahngeschwindigkeit v eines Körpers, z. B. der Geschwindigkeit eines Teiles der Peripherie eines Schwungrades, ist, so können wir für diesen Ausdruck auch einfach setzen (s. auch Seite 56) $\frac{v^2}{r}$. Mit dieser Kraft wird jedes Massenteilchen eines rotierenden Körpers vom Zentrum der Bewegung hinweggetrieben. Um also die Summe der Zentrifugalkräfte eines rotierenden Körpers zu finden, müssen wir den obigen Ausdruck noch mit seiner Masse m multiplizieren. Er wird dadurch $\frac{v^2m}{r}$. Die Zentrifugalkraft ist also



Abplattung einer Kugel durch Rotation. Vgl. Text, S. 90.

proportional der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit, und umgekehrt proportional dem Halbmesser des rotierenden Körpers.

Das hierdurch entstehende Spiel der Kräfte läßt sich an einer einfachen Vorrichtung, der sogenannten **Zentrifugalmaschine**, beobachten. Die Anordnung derselben ist aus der auf S. 87 stehenden Zeichnung unmittelbar ersichtlich. Dreht man an dem Rade R, so kann man die Spindel S in sehr schnelle Umdrehung versetzen. Auf dieser Spindel wird eine Vorkehrung befestigt, auf der zwei verschieden schwere Kugeln, die mit einem Faden verbunden sind, sich auf einem horizontalen Drahte frei bewegen können. Diese werden, wenn man die Spindel in Umdrehung versetzt, beide aus der Mitte fliehen und zwar, vorausgesetzt, daß sie von Anfang an sich auf verschiedenen Seiten von der Mitte befanden, so weit, als der sie verknüpfende Faden es erlaubt. Ihre Entfernungen vom Bewegungszentrum werden sie dabei so einrichten müssen, daß Gleichgewicht eintritt, d. h., daß die auf beide Kugeln ausgeübten Zentrifugalkräfte einander gleich sind. Aus den oben aufgeschriebenen Ausdrücken für diese Kräfte geht leicht hervor,



Plateaus Versuch mit rotierenden Flüssigkeiten zur Darstellung der Bildung von Weltkörpern. Vgl. Text, S. 90.

daß Gleichgewicht vorhanden sein muß, wenn die Massen sich umgekehrt verhalten wie die Entfernungen vom Drehungsmittelpunkt. Ist also die eine Kugel noch einmal so schwer wie die andere, so stellt sie sich beim Umschwung nur halb so weit von der Mitte. Es wird hierbei also eine förmliche Wägung vorgenommen, die jedoch von der Schwerkraft ganz unabhängig ist. Da beide Arten von Wägungen Übereinstimmung ergeben, so zeigt es sich, wenigstens in Bezug auf die beiden hier in Frage kommenden Kräfte, daß das Wesen der Masse lediglich als eine Summe von Angriffspunkten der Kräfte zu bezeichnen ist, und nicht etwa als etwas nach Hinwegdenken der Kräftewirkungen an sich noch Wesentliches. Wir betonen diese Anschauung hier gleich vorweg bei der ersten Gelegenheit, die sich dazu bietet, während wir jedoch an dieser Stelle einschränkend hinzufügen müssen, daß spätere in diesem Werke zu behandelnde Erfahrungen vielleicht im stande sein können, diese Anschauungen zu verändern. Bis auf weiteres aber ist es von Wichtigkeit, uns unter einer Masse nicht etwas Festes, Raumausfüllendes zu denken, wie es den Anschauungen des gemeinen Lebens entspricht, sondern sie nur als ein Maß der Kraftwirkungen ansehen.

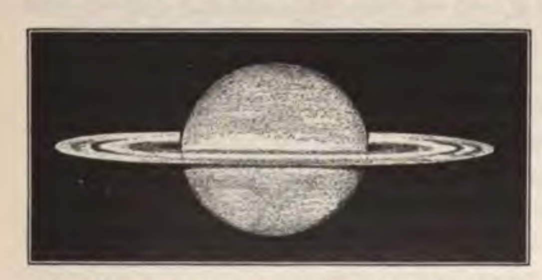
Setzen wir verschieden schwere Massen so in Umschwungsbewegung, daß sie sich untereinander frei bewegen können, dann werden, umgekehrt wie im vorigen Beispiel, die schwereren Massen am weitesten vom Mittelpunkte hinwegfliehen müssen, da hier die Bedingung des Gleichgewichtszustandes wegfällt und bei gleicher Geschwindigkeit und gleichem Radius die Zentrifugal- oder Fliehkraft, mit welcher der Körper sich vom Zentrum zu entfernen sucht, nur noch mit der Masse zunimmt. Nun befestigen wir auf der Spindel ein Gefäß mit verschieden

schweren Flüssigkeiten, z. B. Öl, Wasser und Quecksilber, und sehen, wie das letztere sich in dem Gefäß am weitesten nach außen drängt, weniger das Wasser und am wenigsten das Öl (s. die Abbildung, S. 88). Dies hat man in neuerer Zeit in der Industrie vielfach benutzt, um aus einem Gemisch von verschiedenen, leicht beweglichen Körpern oder Substanzen einzelne Bestandteile auszuscheiden.


Spiralnebel in den Jagdhunden. Aus W. Meyer, „Das Weltgebäude".

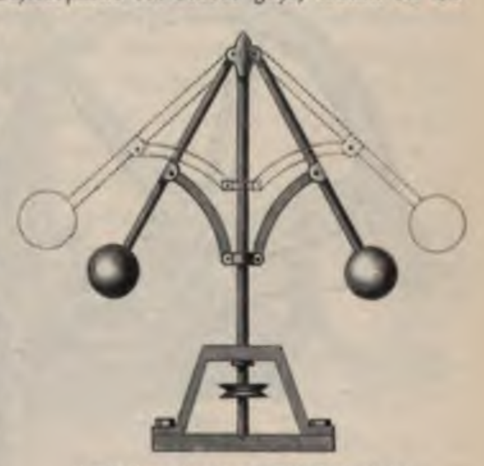
Andere interessante Experimente mit der Zentrifugalmaschine haben eine kosmologische Bedeutung. Zunächst kann man zeigen, wie die Abplattung der Erde durch ihre Achsendrehung zu stande kommen mußte. Gestaltet man aus elastischen Reifen, die in Meridianen angeordnet sind, eine Kugel und läßt dieselbe so um eine Achse rotieren, daß die Meridiane an dem einen Pole nicht an der Achse befestigt sind, so wird sich die Kugel je mehr abplatten, in je schnelleren Umschwung sie versetzt wird (s. die Abbildung, S. 88). Richtet man den Versuch so ein, daß man ihn beliebig weiter treiben kann, indem man z. B. eine Flüssigkeit in einer anderen von nahezu gleichem spezifischen Gewicht rotieren läßt, wie es Plateau tat (s. die Abbildung, S. 89), so wird die abgeplattete Kugel bald zu einer flachen Linse werden, wie man deren als Nebelflecke viele am Himmel sieht. Schließlich kann der innere Zusammenhang der Massen der Zentrifugalkraft nicht mehr widerstehen; es löst sich ein Ring, wie der des Saturn, von der Linse (s. die untenstehende Abbildung), oder das Ganze geht in Spiralform über, für die man gleichfalls viele Repräsentanten im Weltgebäude findet (s. die obenstehende Abbildung). Vgl. des Verfassers „Weltgebäude", S. 354 u. f.

Wir gestalten das Experiment nun derart, daß wir an der Spindel der Zentrifugalmaschine eine Stange als Achse und an deren oberen Ende eine andere Stange so durch ein Scharnier befestigen, daß diese sich nur dort auf und nieder bewegen kann. Das untere Ende dieser beweglichen Stange erhält ein Gewicht. Dann wird dieses beim Umschwung aufgetrieben, und die beiden Stangen bilden einen Winkel miteinander, der um so größer ist, je schneller die Vorrichtung rotiert. Das Gewicht pendelt also mit den Schwankungen dieser Geschwindigkeit hin und her; man hat die Vorrichtung deshalb ein Zentrifugalpendel genannt und benutzt sie bekanntlich zur Regulierung der Tätigkeit von Dampfmaschinen oder zu verwandten Zwecken (s. die Abbildung, S. 91). Bringt man nämlich an der Pendelstange ein Gelenk an, das ein Ventil für die Dampfzulassung um so mehr drosselt, je mehr sich das Pendel von der Drehungsachse entfernt, so wird es den


Saturn mit Ring. Aus W. Meyer, „Das Weltgebäude".

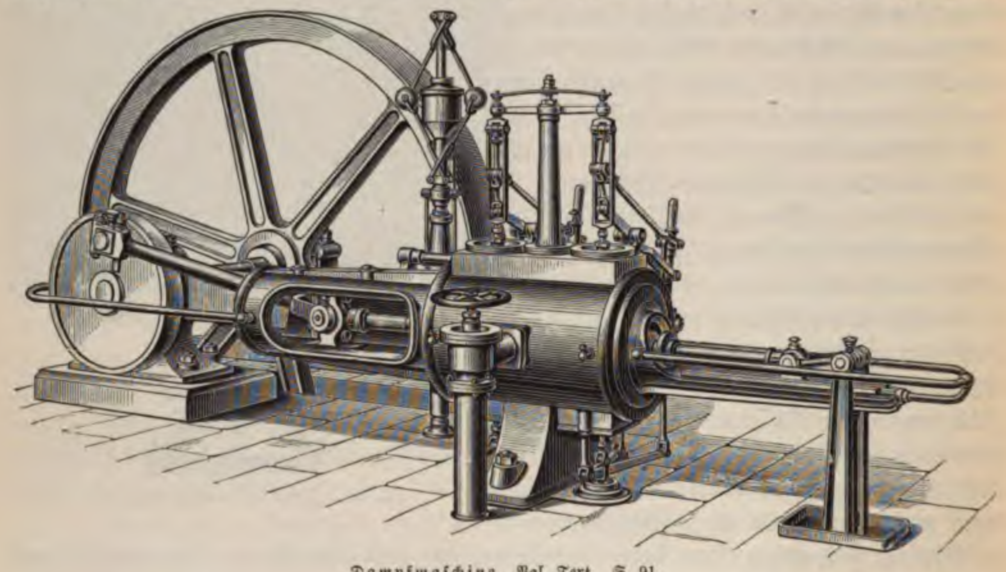
Dampf um so mehr abschließen, je schneller die Maschine läuft, und dadurch diese Geschwindigkeit vermindern. Geht die Maschine dagegen zu langsam, so wird das Pendel sinken und dadurch wieder mehr Dampf zulassen. Man sieht, daß auf diese Weise eine ganz bestimmte Geschwindigkeit der Maschine erhalten bleiben muß (s. die Abbildung, S. 92).

Auch noch bei einem anderen wichtigen Teile der Dampfmaschinen spielt die Fliehkraft eine wenn auch nur sekundäre Rolle: bei dem Schwungrad. In der Hauptsache wird bei ihm die Wirkung der Trägheit benutzt, die es im Schwung erhält, auch wenn die treibende Kraft zeitweise aufhört zu wirken. Dadurch werden die stoßweisen Wirkungen des Kolbens, der nach Schluß des Dampfventils wieder zurückgetrieben werden muß, in eine gleichförmige Bewegung umgesetzt. Die Zentrifugalkraft ist nur insofern hierbei zu berücksichtigen, als sie ungemein störend, ja für die Maschine vernichtend in die Arbeit des Schwungrades eingreifen kann. Es genügt hier nicht, daß die Achse durch den Schwerpunkt des Rades geht, womit die Bedingung des indifferenten Gleichgewichtszustandes erfüllt ist (s. S. 88), sondern sie muß zugleich auch die sogenannte Figurenachse sein. Unter einer solchen verstehen wir eine Linie, zu der alle Teile eines Körpers völlig symmetrisch liegen. In unserem Falle müssen also die Durchmesser des Schwungrades senkrecht auf seiner Achse stehen. Ist dann noch dafür gesorgt, daß die Masse überall gleichmäßig in demselben verteilt ist, ist z. B. kein Gußfehler vorhanden, so muß für jeden beliebigen Massenteil desselben auf der anderen Seite der Achse ein anderer Massenteil vorhanden sein, für welchen die jeweilig wirkende Fliehkraft die gleiche, aber entgegengesetzte ist wie für ihn. Die Achsenlager werden dann von der Fliehkraft gar nicht in Anspruch genommen. Man darf infolgedessen aber nicht etwa meinen, daß innerhalb des Schwungrades nun überhaupt keine Fliehkräfte wirkten. Bei entsprechend gesteigerter Geschwindigkeit kann vielmehr ein noch so gut zentriertes Schwungrad von der Zentrifugalkraft auseinandergerissen werden, wenn seine Festigkeit der Fliehkraft keinen genügenden Widerstand leistet.


Zentrifugalpendel. Vgl. Text, S. 90.

Bildet aber die Umdrehungsachse einen Winkel zur Figurenachse, so greift die Fliehkraft mit einem Hebelarm an, der jenem Winkel und dem Halbmesser des Rades entspricht, indem sie bestrebt ist, die beiden Achsen wieder zusammenfallend zu machen (s. die obere Abbildung, S. 93). In unserer Abbildung ist f das Maß für diese Kraft. Dieselbe kann unter Umständen wesentlich größer werden als etwa die entsprechende Schwerewirkung, die ein um ebensoviel aus dem Lot gebrachtes Gewicht zurückzuführen trachtet. Der weiter oben gegebene mathematische Ausdruck für die Fliehkraft gibt uns ein Maß für ihr Verhältnis zur Schwere. Wir finden z. B., daß Peripherieteile eines Schwungrades von 1 m Halbmesser, das in der Sekunde zwei Umdrehungen macht, bereits 16mal kräftiger fortgeschleudert als von der Erde angezogen werden. Bei einem kleinen Rade von 4 cm Halbmesser, das 20mal in der Sekunde umschwingt, ist die Schwungkraft am Rande sogar 64mal größer als die Schwere. Mit einer um ebensoviel größeren Gewalt sucht sich demnach ein zur Achse schief stehendes Schwungrad gerade zu stellen und drückt entsprechend auf seine Achsenlager.

Die sehr eigentümlichen Erscheinungen des **Kreisels**, die uns schon im Kinderspiel erfreuten, und die im gewaltigen Spiel der umschwingenden Weltkörper uns vor Augen treten, finden ihre Erklärung in den hier entwickelten Prinzipien (s. die mittlere Abbildung, S. 93). Wir erstaunen jetzt nicht mehr darüber, daß ein auf seine Spitze gestellter Kreisel, in Umdrehung versetzt, aufrecht stehen bleibt; das ist nicht merkwürdiger, als wenn wir sehen, daß dieser selbe Kreisel, ohne umzuschwingen, auch stehen bleibt, wenn wir an beiden Enden eines seiner Durchmesser je einen Faden befestigen, beide wagerecht über eine Rolle führen und durch beiderseits gleiche Gewichte beschweren, die viel größer sind als das Gewicht des Kreisels. Diese Gewichte werden ihn auch immer wieder in seine ursprüngliche Lage zurückziehen, wenn man ihn aus derselben entfernt hatte; ebenso wird der rotierende Kreisel Widerstand leisten, wenn man die Lage seiner Umdrehungsachse zu verändern sucht, und, aus derselben verdrängt, in sie wieder



Dampfmaschine. Vgl. Text, S. 91.

zurückzukehren trachten. Hierbei tritt dann notwendig ein Widerspiel der Fliehkraft mit der Trägheit ein, das mit den Schwingungen des Pendels ganz vergleichbar ist, doch in der Form verwickeltere Erscheinungen hervorbringt. Die Einwirkung auf den rotierenden Kreisel durch Hemmung oder Stoß zerlegt sich vermöge seiner Drehung sofort in mehrere Komponenten. Das freie Ende seiner Drehungsachse beschreibt dadurch verschlungene Kurven, deren Form jedoch aus den erörterten Prinzipien mit Hilfe der mathematischen Rechnung voraus bestimmt werden kann. Wir geben einige solcher Kurven S. 93 unten wieder. Sie stellen den Weg dar, den das Achsenende f in der Figur a des Kreisels k unter verschiedenen Bedingungen beschreibt, wenn das obere Ende e der Achse festgehalten wird. Man ist erstaunt, einen Körper so vielartige, wenn auch symmetrische Bewegungen ausführen zu sehen, der verhältnismäßig sehr einfachen Anfangswirkungen ausgesetzt worden war. Selbst das einfachste Spiel uns wohlbekannter Naturkräfte verschlingt sich in so wunderbaren Formen. Finden wir nun später unabweisliche Anhaltspunkte dafür, daß die kleinsten Teile, in welche wir im Geiste die Körper zerlegen, unter der Wirkung der Naturkräfte gleichfalls vielartige Bewegungen ausführen müssen, so wollen wir dies von vornherein nicht merkwürdiger finden als eben dieses Spiel des Kreisels.

Und wie jene allerkleinsten Bewegungen nach denselben Prinzipien der allgemeinen Mechanik vor sich gehen müssen, die wir an den Körpern in unseren Händen wahrnehmen, so führen Weltkörper alle ihre Bewegungen nach den Prinzipien einer Himmelsmechanik aus, die nur in ihrer mathematischen Ausarbeitung, nicht in ihrem Wesen, von jener verschieden ist. So ist unsere Erde durchaus mit einem ungeheuern Kreisel zu vergleichen, der aus seiner einfach rotierenden Bewegung durch fortwährende Stöße gegen seine äquatoriale Anschwellung wegen der Anziehung von Sonne und Mond gestört wird. Das Ende der Erdachse beschreibt deshalb eine Spirallinie, die der Kreiselbewegung ähnlich ist. Ihre Dimensionen kann man nach den uns bekannt gewordenen Gesetzen der Mechanik berechnen und findet das Resultat übereinstimmend mit der Beobachtung. Man nennt diese Bewegungen die Präzession und Nutation der Erdachse. Außer diesen hat man nun in den letzten Jahrzehnten noch andere Bewegungen der Erdachse wahrgenommen, die bisher nur sehr klein sind, und deren Ursache man noch nicht kennt. Trotzdem würde man im stande sein, aus der Größe dieser Polschwankungen auf die Größe der unbekannten Kraft zurückzuschließen, welche auch diese kleinste Bewegung der Erdachse hervorruft (vgl. hierüber des Verfassers „Weltgebäude“).



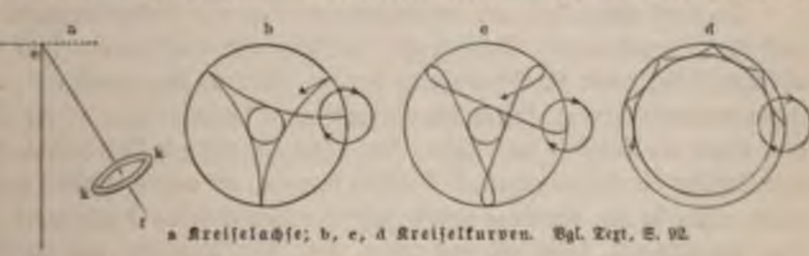
Schiefliegendes Schwungrad. Vgl. Text, S. 91.



Kreiselbewegung: a Bewegung des Kreisels um sich selbst, b Bewegung des Kreisels um seine Mittellage. Vgl. Text, S. 92.

Spielt die Zentralbewegung in der Welt der Himmelskörper eine besonders hervorragende Rolle, so versteckt sich dagegen eine andere Bewegungsform, die der Wellenbewegung, meist hinter so kleine Dimensionen, daß unsere optischen Hilfsmittel nicht mehr ausreichen, um sie dem leiblichen Auge sichtbar zu machen, während sie das geistige Auge nicht nur als vorhanden erkannt, sondern es zweifellos gemacht hat, daß überhaupt die gesamte Erscheinungswelt unseren Sinnen erst durch allerfeinste Wellenbewegungen zugänglich wird. Wir müssen deshalb die allgemeinen Prinzipien dieser Bewegungsform hier schon entwickeln.

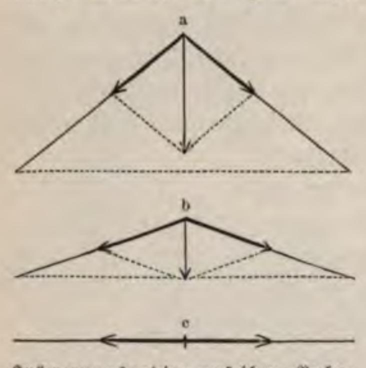
Das Wortbild der Wellenbewegung nahmen wir aus der betreffenden Erscheinung auf der Wasseroberfläche. Aber auch an nicht flüssigen, nur in ihren einzelnen Teilen biegsamen Körpern können wir sie beobachten, wie an Ketten, Seilen, gespannten Saiten. Da wir über die Ursachen, welche die hier nötige Biegsamkeit der Körper hervorbringt, an dieser Stelle unserer Darstellungen noch nicht unterrichtet sind, weisen wir zunächst darauf hin, daß die einzelnen Teile einer Kette als absolut starre Körper angesehen werden können, während doch die Erscheinungen der Wellenbewegung mit ihnen zu erzeugen sind. Wir dürfen also annehmen, daß diejenigen Eigenschaften der Biegsamkeit, welche bei der Wellenbewegung in Betracht



a Kreiselachse; b, c, d Kreiselkurven. Vgl. Text, S. 92.

kommen, als ein kettenförmiger Zusammenhang der kleinsten Teile des Seiles, der Saite u. s. w. wirken.

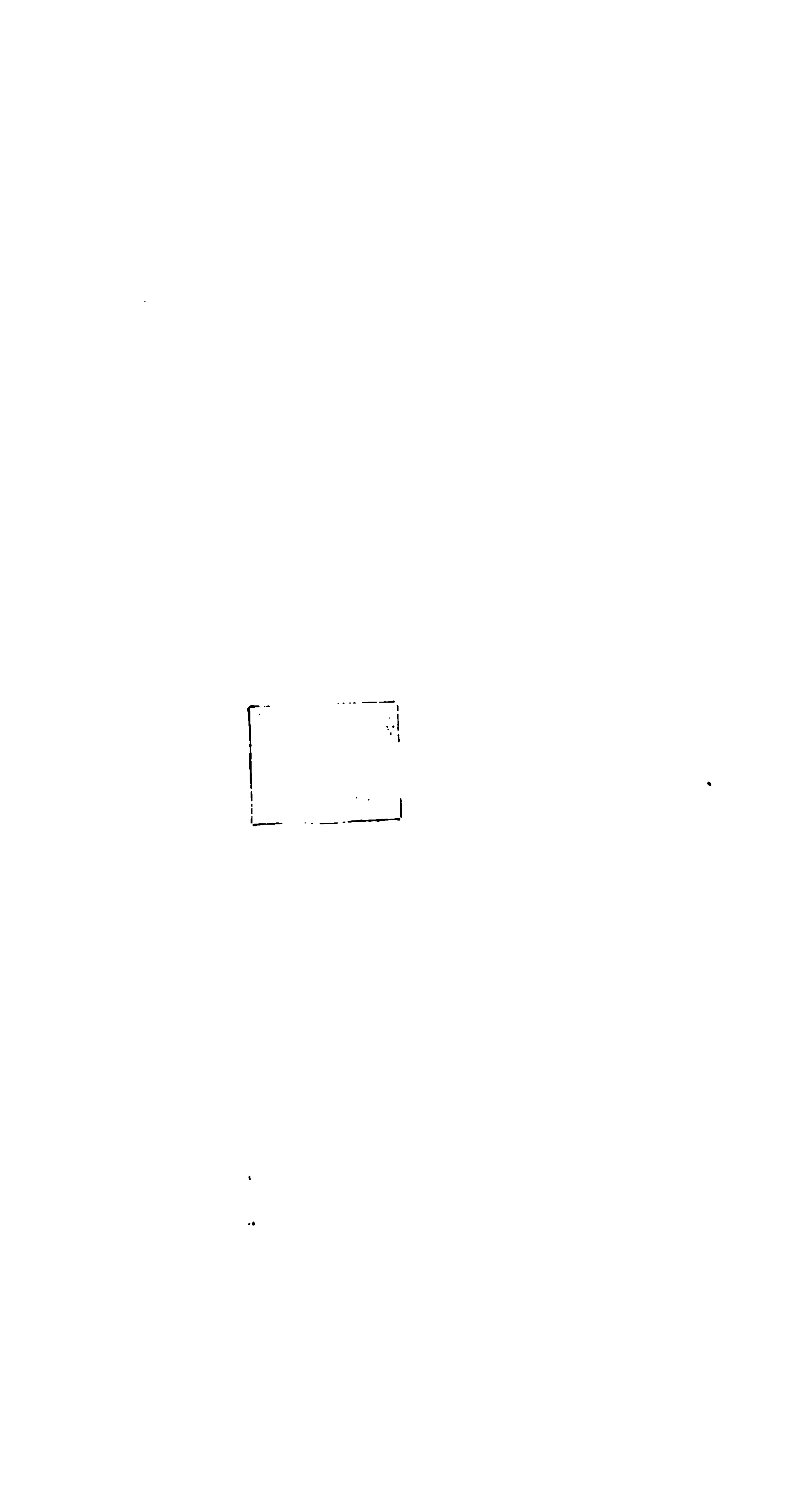
Ist ein Seil mit einer gewissen Kraft gespannt, die wir ja stets durch ein Gewicht ausdrücken können, das an ihm zieht, und suchen wir es nun durch einen Druck auf irgend einer Stelle desselben aus seiner Ruhelage zu bringen, so wird die Spannung (das angehängte Gewicht) T es wieder zurückzutreiben trachten. Die Geschwindigkeit oder, korrekter ausgedrückt, die Beschleunigung, mit der dies geschieht, ist offenbar proportional dieser Zugkraft T, und zugleich umgekehrt proportional der Masse m eines jeden zu bewegenden Teilchens. Denn wir begreifen auch hier unmittelbar, daß die Bewegung um so langsamer werden muß, je mehr Masse zu bewegen ist. Diese beiden Faktoren würden aber nur zur Beschreibung der Bewegung genügen, wenn der Zug T in der Richtung der Saite wirken könnte, während die letztere doch durch den Stoß aus ihrer Ruhelage entfernt ist. Da aber die einzelnen „Kettenglieder“ miteinander im Zusammenhange sind, muß diese Kraft in seitlicher Richtung angreifen. Mit Anwendung des Parallelogramms der Kräfte finden wir (s. die nebenstehende Abbildung), daß wir den Ausdruck $T:m$ noch durch den sogenannten Krümmungsradius r der Ausbiegung, die wir der Saite erteilt haben, dividieren müssen, um die Kraft $k = \frac{T}{mr}$ zu erhalten, mit welcher jeder Teil einer aus ihrer Ruhelage gezogenen Saite wieder in dieselbe zurückzukehren trachtet.



Krümmungsradien aus ihrer Ruhelage gezogener Saiten. Bei dem Ausschlag a ist r (der Krümmungsradius) groß, bei b kleiner, bei c gleich Null.

Lassen wir nun die eine Weile festgehaltene Saite los, so wird eine Bewegungserscheinung eintreten, die der des Pendels in jeder Hinsicht vergleichbar ist. Alle Teile der Saite werden mit einer gewissen Geschwindigkeit in ihrer Ruhelage ankommen und diese deshalb überschreiten. Auf der anderen Seite schwingen sie nun, von Widerständen abgesehen, wieder um ebensoviel aus ihrer Ruhelage heraus, kehren um, schwingen zurück u. s. f. Auch die Saite würde, wie das Pendel, immerfort mit derselben Kraft, also mit gleichen Ausschlägen (Amplituden) nach beiden Seiten weiterschwingen, wenn sie nicht noch außer dieser Arbeit andere auszuführen hätte, von denen die vornehmste bekanntlich ist, die Luft in Mitschwingungen zu versetzen, wodurch sie für uns die physiologische Erscheinung des Tones auslöst. Hiermit haben wir uns erst in dem akustischen Kapitel näher zu befassen.

Um durch dieses Auf- und Niederschwingen aber eine Wellenbewegung zu erzeugen, muß noch etwas hinzukommen. Bringen wir die Saite nicht langsam aus ihrer Ruhelage, so daß alle ihre Teile, bevor die Schwingung beginnt, die neue Lage annehmen, welche ihr innerer Zusammenhang bedingt, führen wir vielmehr einen kurzen Schlag auf die Saite aus, so können, wegen der Trägheit der Massen, nicht sofort alle übrigen Teile folgen. Während also nach dem Schlage die Spannungskraft T sofort beginnt, die von ihm direkt getroffenen Teile der Saite wieder in ihre Ruhelage zurückzuführen, reißen diese die benachbarten Teile in der Richtung des Schlages, sagen wir nach unten, hin. Wir sehen also, daß gewisse „Kettenglieder“ bereits wieder nach oben schwingen, wenn benachbarte sich nach unten bewegen. Es entsteht eine wirkliche Wellenlinie. Die rechts und links von der Schlagstelle nunmehr nach unten schwingenden Kettenglieder reißen ihrerseits die entfernter liegenden mit hinab, die wieder in ihrer





Ideallandschaft. Regenbogen und Meereswogen.
Nach *Harder*.

[illegible] müssen, während die Glieder, welche diese Bewegung veranlaßten, schon [illegible] bewegen. So geht es längs der ganzen Saite weiter. Es entsteht dadurch [illegible] Schein, als ob eine Welle längs der Saite hinliefe, während doch diese [illegible] Bewegung nur auf der reellen Auf- und Abbewegung der einzelnen Kettenglieder [illegible] gleichzeitig eine verschiedene Phase besitzt (s. die untenstehende [illegible]. [illegible] dies an der sogenannten Wellenmaschine zu versinnlichen, die [illegible] abgebildet ist. Sie besteht aus einer Reihe von Metallknöpfen, die [illegible] und sich an diesen nur auf und ab bewegen können. Unten gleiten [illegible] wellenförmige Ebene, die hin und her gezogen werden kann.

[illegible] Wellenbewegungen des Wassers finden in ganz gleicher Weise statt. Bei nicht [illegible], als auf dem Meere, wo die Wellenbewegungen zu ihrer imposantesten [illegible], bewegen sich die Wasserteilchen, welche die Wellen erzeugen, trotz der [illegible], mit der wir oft die Wellen auf das ihrer Gewalt überlassene Schiff [illegible], doch nur auf und ab, wie man an Korkstückchen auf der Oberfläche leicht



Reflektierte Welle.

[illegible] kann. Auf den ersten Blick anschaulich und zugleich auch landschaftlich [illegible] wirksam zeigt sich diese Erscheinung am Einfluß der Rhone in den [illegible]. [illegible] Gebirgsstrom drängt hier seine grauen Gletscherwasser noch weit [illegible] hinaus in die tiefblauen Fluten des herrlichen Sees. Da jenes Gletscher-[illegible] als das des Sees, so sinkt es an einer scharf durch die verschiedene Farbe [illegible] das Seewasser hinab. Die Wellen der Seeoberfläche aber gehen un-[illegible] Wasserbewegungen über diese Stelle hinweg.

[illegible] landschaftliche Darstellung mag uns einen Teil der vielseitigen Auf-[illegible] der Wellenbewegung in der Natur obliegen, von den großen Meeres-[illegible] erzeugen, bis zu jenen allerkleinsten Ätherwellen des Lichtes, [illegible] unserem Auge übermitteln und die Erscheinung des Regen-[illegible]. [illegible] wir auch gehen und stehen mögen, umbranden uns Wellenzüge [illegible] verhältnissen.

[illegible] Saite zurückkehrend, sehen wir nun, daß die sie durchlaufende Welle, [illegible], von dem unüberwindlichen Widerstande der festen Aufhängung der [illegible], wie eine Wasserwelle von den Strandfelsen. Kam sie als nach unten [illegible], so verläßt sie es nun in umgekehrter Form, also nach oben ge-[illegible] Richtung; man sagt, sie wird reflektiert. Am anderen Ende [illegible] und so fort, bis die äußeren Widerstände alles zur Ruhe bringen [illegible]. Daß dies so stattfinden muß, würde eine einfache Betrachtung [illegible] nicht aufhalten wollen.



Ideallandschaft. Regenbogen und Meereswogen.

Bewegung fortfahren müssen, während die Glieder, welche diese Bewegung veranlaßten, schon wieder nach oben schwingen. So geht es längs der ganzen Saite weiter. Es entsteht dadurch für unser Auge der Schein, als ob eine Welle längs der Saite hinliefe, während doch diese scheinbare Bewegung nur auf der reellen Auf- und Abbewegung der einzelnen Kettenglieder beruht, die für jedes derselben gleichzeitig eine verschiedene Phase besitzt (s. die untenstehende Abbildung). Man pflegt dies an der sogenannten Wellenmaschine zu versinnlichen, die weiter unten im Lichtkapitel abgebildet ist. Sie besteht aus einer Reihe von Metallknöpfen, die an Stiften befestigt sind und sich an diesen nur auf und ab bewegen können. Unten gleiten diese Stifte über eine wellenförmige Ebene, die hin und her gezogen werden kann.

Auch die Wellenbewegungen des Wassers finden in ganz gleicher Weise statt. Bei nicht fließenden Gewässern, also auf dem Meere, wo die Wellenbewegungen zu ihrer imposantesten Entwickelung gelangen, bewegen sich die Wasserteilchen, welche die Wellen erzeugen, trotz der rasenden Geschwindigkeit, mit der wir oft die Wellen auf das ihrer Gewalt überlassene Schiff einstürmen sehen, doch nur auf und ab, wie man an Korkstückchen auf der Oberfläche leicht


Reflektierte Welle.

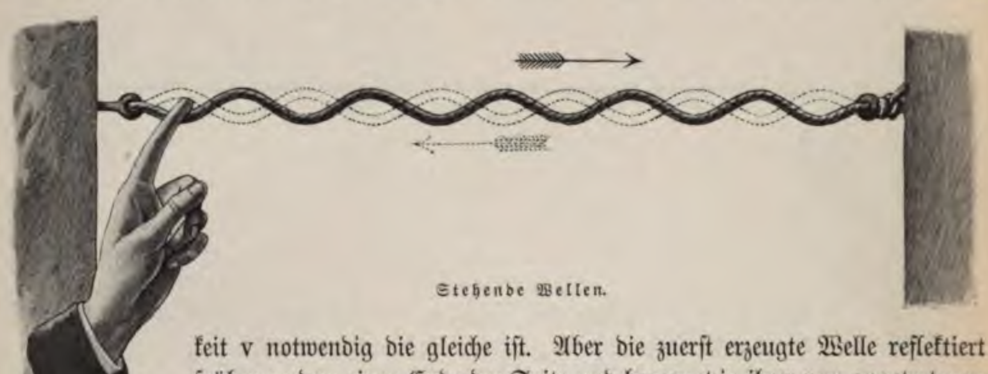
sehen kann. Auf den ersten Blick anschaulich und zugleich auch landschaftlich besonders wirksam zeigt sich diese Erscheinung am Einfluß der Rhone in den Genfer See. Der reißende Gebirgsstrom drängt hier seine grauen Gletscherwasser noch weit über seine Einmündung hinaus in die tiefblauen Fluten des herrlichen Sees. Da jenes Gletscherwasser aber kälter ist als das des Sees, so sinkt es an einer scharf durch die verschiedene Farbe markierten Stelle unter das Seewasser hinab. Die Wellen der Seeoberfläche aber gehen unbekümmert um jene wirklichen Wasserbewegungen über diese Stelle hinweg.

Unsere beigeheftete landschaftliche Darstellung mag uns einen Teil der vielseitigen Aufgaben versinnlichen, welche der Wellenbewegung in der Natur obliegen, von den großen Meereswellen, welche die Uferbrandung erzeugen, bis zu jenen allerkleinsten Ätherwellen des Lichtes, die die Farbenpracht der Landschaft unserem Auge übermitteln und die Erscheinung des Regenbogens hervorbringen. Wo wir auch gehen und stehen mögen, umbranden uns Wellenzüge von den verschiedensten Größenverhältnissen.

Zu unserer gespannten Saite zurückkehrend, sehen wir nun, daß die sie durchlaufende Welle, am einen Ende angelangt, von dem unüberwindlichen Widerstande der festen Aufhängung der Saite zurückgeworfen wird, wie eine Wasserwelle von den Strandfelsen. Kam sie als nach unten gekrümmte Welle am Ende an, so verläßt sie es nun in umgekehrter Form, also nach oben gekrümmt, und in umgekehrter Richtung; man sagt, sie wird reflektiert. Am anderen Ende wiederholt sich dasselbe Spiel und so fort, bis die äußeren Widerstände alles zur Ruhe bringen (s. die obenstehende Abbildung). Daß dies so stattfinden muß, würde eine einfache Betrachtung lehren, bei der wir uns aber hier nicht aufhalten wollen.

Theorie und Beobachtung lehren ferner in Übereinstimmung miteinander, daß die **Geschwindigkeit**, mit welcher eine solche Welle scheinbar längs der Saite oder irgend einer mit ihr vergleichbaren Massenverbindung sich fortpflanzt, unabhängig von der Größe der Ausbiegung, der Amplitüde, oder **Wellenhöhe** ist, welche die wahre Bewegung der Teilchen angibt, und sich verhält wie die Quadratwurzel aus dem schon früher benutzten Verhältnis der Spannung zur Masse jedes bewegten Teilchens. Nennen wir also die Geschwindigkeit dieser scheinbaren Wellenbewegung v, so haben wir den für alle die später zu behandelnden Arten von Wellenbewegungen notwendig geltenden Ausdruck für ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit $v = \sqrt{\frac{T}{m}}$.

Noch eine andere merkwürdige Erscheinung der Wellenbewegung spielt in unseren folgenden Betrachtungen eine wichtige Rolle, die der sogenannten **stehenden Wellen**. Führen wir gegen eine gespannte Saite **zwei** Schläge aus, oder, allgemeiner ausgedrückt, lassen wir zwei Kräfte nacheinander so auf sie wirken, daß zwei hintereinander herlaufende Wellen von gleicher Größe entstehen, so werden diese zwar sich zunächst nicht einholen können, weil ihre Geschwindigkeit v notwendig die gleiche ist. Aber die zuerst erzeugte Welle reflektiert früher an dem einen Ende der Saite und begegnet in ihrer nun angetretenen rückläufigen Bewegung die ankommende, noch rechtläufige zweite Welle. Die eine bewegt in Wirklichkeit die Teile der Saite nach oben, während die andere sie nach unten zieht. Es muß also irgendwo ein Punkt vorhanden sein, wo die direkte und die reflektierte Wellenbewegung einander genau aufheben, d. h. wo der betreffende Teil der Saite überhaupt keine Bewegung ausführt. Die Lage dieses Punktes zu einem Ende der Saite wird aber offenbar immer dieselbe bleiben, weil die Geschwindigkeit der Wellen unveränderlich ist (s. die obenstehende Abbildung). Je nach dem Verhältnis dieser Geschwindigkeit zu der Länge der Saite werden auch mehrere solcher **Knotenpunkte** entstehen, die gleiche Abstände voneinander beibehalten. Zwischen diesen scheint jetzt die Saite nur auf und nieder zu schwingen, so, als ob die Knotenpunkte Endpunkte seien, zwischen denen nur immer eine große Schwingung stattfindet: die Wellen scheinen fest zu stehen. Da der Abstand der Knotenpunkte voneinander ausschließlich von der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen abhängt, so kann er ein Maß für diese werden und wird auch in der Regel zur Bestimmung dieser Geschwindigkeit benutzt, weil man die feststehenden Knotenpunkte immer viel genauer beobachten kann als die forteilenden Wellen; ja viele Wellenbewegungen gehen so schnell vor sich, daß unser Auge sie überhaupt nicht mehr wahrzunehmen vermag. Nur aus dem Vorhandensein solcher Knotenpunkte und anderer hier dargestellten Eigenschaften der Wellenbewegung schließt man auf ihr Vorhandensein und ihre Geschwindigkeit, worauf wir noch öfters zurückkommen.



Stehende Wellen.

Die Erscheinung selbst dieser Wellenzüge, welche sich durchkreuzen und dadurch Knotenpunkte, beziehungsweise stehende Wellen erzeugen, nennt man Interferenz.

Jedermann weiß, daß man sie sehr leicht auf der Wasseroberfläche bilden kann, indem man in einiger Entfernung voneinander zwei Steine ins Wasser wirft. Jeder Stein bildet für sich einen sich schnell ausbreitenden Wellenkreis. Wo aber beide Wellenkreise übereinandergreifen, werden stehende Wellen erzeugt, die um so auffälliger sind, als das Wasser zwischen den Knotenpunkten viel kräftiger auf und nieder wogt als in den fortschreitenden Wellenkreisen, weil sich ja hier die Wirkung beider Wellenzüge summiert. Noch viel deutlicher kann man die Wirkung stehender Wellen an dem Sand unter der Wasserfläche eines flachen Ufers erkennen. Die gleichmäßigen Wellenzüge werden am Ufer reflektiert und rufen deshalb in seiner Nähe stehende Wellen hervor. Die hier besonders stark auf und nieder steigenden Wasserteilchen wirken auf die Verteilung des Sandes am Grund und schaffen hier ein umgekehrtes Bild der stehenden Wellen. Jedermann hat diese Kräuselungen des Ufersandes schon gesehen. Auch im Dünen- und Wüstensande bewirken die sich von Terrainunebenheiten reflektierenden Windstöße stehende Wellen, wie die nebenstehende Abbildung zeigt. Die Wüste stellt sich hier als ein zu Stein gewordenes, wild bewegtes Meer dar. Diese Erscheinungen haben den Genfer Forscher Casimir Decandolle auf einen sehr merkwürdigen Gedanken gebracht. Er füllte Dosen nahezu ganz mit Wasser und etwas Sand an und führte mit diesen schaukelnde und andere Bewegungen aus, die in der Dose interferierende Wellen hervorriefen und dadurch den Sand zu den verschiedensten oft ungemein zierlichen Gruppierungen veranlaßte, die bei derselben Form der Dose und derselben Art von Bewegung immer gleiche Figuren aufwiesen (s. die Abbildungen, S. 98). Diese erinnern nun oft in ganz auffälliger Weise an die äußerst zierlichen Gruppierungen der feinen Rippen in den Gehäusen mikroskopisch kleiner Tiere und Pflanzen, die im Wasser leben und dort ruckweise sich rhythmisch wiederholende Bewegungen ausführen. Es ist wohl möglich, daß beim Aufbau dieser reizenden Formen der mikroskopischen Welt die oben geschilderten einfachen Wellenbewegungen eine Hauptrolle gespielt haben. Jedenfalls sehen wir aus diesem Beispiel, daß wir die verwickelten Erscheinungen der Lebewesen nur durch das eingehende Studium des weit einfacheren Spiels der Kräfte in der toten Natur schrittweise verstehen lernen können.



Wellen im Wüstensande. Nach Vaughan Cornish.

Eine andere Art von Bewegung, welche mit der der Wellen eine gewisse innere Ähnlichkeit hat, wird durch den sogenannten elastischen Stoß hervorgerufen. Lassen wir einen Gummiball zur Erde fallen, so schnellt er wieder von ihr empor und würde seine ursprüngliche Höhe wieder erreichen, wenn er sich ohne Widerstand bewegen könnte. Das Spiel würde sich fortsetzen wie das Auf- und Niedersteigen jedes Teilchens einer angeschlagenen Saite oder die

Bewegung des Pendels. Die Erscheinung wird hervorgerufen einerseits durch die Biegsamkeit des Gummiballes, anderseits durch die Eigenschaft desselben, durch welche er seine ursprüngliche Form wieder anzunehmen strebt, wenn eine äußere Kraft dieselbe gestört hat. Man nennt diese Eigenschaft die Elastizität eines Körpers. Unsere vorhin betrachtete Saite besaß eigentlich auch die hierzu nötigen Eigenschaften. Sie ist biegsam und sucht durch das sie spannende Gewicht ihre ursprüngliche Form, d. h. in diesem Fall ihre Ruhelage, wieder einzunehmen. Wir müssen also annehmen, daß die einzelnen Teile des Gummiballes durch eine ähnliche Spannkraft zusammengehalten werden. Wären die Enden einer schwingenden Saite nicht fest, sondern so eingerichtet, daß sie einem von der Saite ausgeübten Druck nachgeben könnten, und schlüge die Saite bei ihrer Schwingung auf einen festen Gegenstand, wie der Ball auf die Erde, so würde sie ganz genau dieselbe Erscheinung wie dieser zeigen.



Decandolles Sandfiguren. Nach „Archiv des séances physiques, Genève". Vgl. Text, S. 97.

Der Ball setzt, nachdem er die Erde eben berührt, seine Fallbewegung noch eine Weile fort, bis die Elastizität ihr die Wage hält, beziehungsweise ihre Gegenwirkung beginnt. Der Ball muß dabei teilweise zusammengedrückt werden. Diese Zeit von der ersten Berührung bis zum Beginn der Gegenwirkung entspricht der halben Schwingungszeit einer Saite, für welche wir den Ausdruck T:m fanden. T drückt hier den Grad der inneren Spannung, der Elastizität, aus; für m dagegen haben wir die Kraft zu setzen, mit welcher der Körper beim freien Fall aufstößt. Letztere ist für alle Körper bei gleicher Fallhöhe gleich. Aber die Schwingungszeit und der Schwingungsbogen sind bei diesem Experimente bei den verschiedenen Körpern sehr verschieden. Eine Billardkugel berührt kaum die feste Unterlage, auf die man sie herabfallen ließ, um sofort wieder emporzuschnellen. Dabei scheint sie ihre Form nicht zu verändern. Richten wir es jedoch so ein, daß die Berührungsstellen der Kugel mit der Unterlage sich auf beiden markieren, so sehen wir, daß sie nicht Punkte, sondern Scheibchen bilden. Auch das Elfenbein der Billardkugel wird also durch den Stoß in Schwingungen versetzt, nur sind diese wesentlich kleiner und schneller

als die des Gummis; die Spannung T der kleinsten Kettenglieder des Elfenbeins ist viel größer. Wir haben bisher angenommen, daß die Unterlage absolut starr sei, was der Wirklichkeit niemals entsprechen wird. Ist auch die Unterlage elastisch, so werden die Schwingungsbogen und -Zeiten des stoßenden und des gestoßenen Körpers sich so verteilen, daß derselbe Effekt erreicht, d. h. die Kugel wieder zu derselben Höhe emporgetrieben wird, aus der sie herabfiel.

Die Stoßwirkung hat noch eine andere, sehr interessante und wichtige Ähnlichkeit mit der Schwingung einer Saite: der Stoß wird ebenso reflektiert, wie jeder Billardspieler aus Erfahrung weiß. Eine Billardkugel, die unter einem gewissen Winkel die Bande trifft, wird, abgesehen von ihrer eventuellen Drehung, von ihr in demselben Winkel, nur nach der anderen Seite hin, zurückgestoßen (s. die untenstehende Abbildung). Ist die auffallende Richtung i, so wird die reflektierte 180°—i. Im Stoßpunkte verhält sich also der Ball genau wie das letzte Element einer schwingenden Saite. Dies wollen wir uns für spätere wichtige Betrachtungen merken.

Ist nach einer Anzahl von Auf- und Niederbewegungen der Gummiball zur Ruhe gekommen, so berührt er seine Unterlage auch jetzt nicht nur in einem Punkte, sondern auf einer scheibenförmigen Stelle, die allerdings kleiner ist als die, welche er beim Niederfallen aus einer gewissen Höhe anzeigt. Die Formveränderung des Balles beim ruhigen Aufliegen ist jetzt nur noch die Folge eines Ausgleichs zwischen seiner eigenen Schwere und seiner Elastizität, beziehungsweise auch der seiner Unterlage. Beide üben einen Druck aufeinander aus, der eine besondere Spannung ihrer kleinsten Körperelemente untereinander erzeugt, so, als wenn man eine Saite dauernd aus ihrer Ruhelage bringt, was natürlich nur durch Anwendung einer besonderen Kraft geschehen kann. Jetzt muß die Saite ihre Bewegung nicht wie früher durch Hinzufügung, sondern durch Entfernung einer Kraft beginnen. Der Druckzustand, unter welchem sie dies vermag, wird uns noch als Arbeitsvorrat oder potentielle Energie interessieren.



Reflektierte Billardkugel.

In der Praxis wird diese Spannkraft bekanntlich in der Federwirkung vielfach verwendet, für uns am lehrreichsten in der Federwage. Die Zugkraft eines Gewichtes infolge seiner Schwere wird bei derselben verglichen mit der elastischen Kraft einer metallenen Spiralfeder, die im wesentlichen unveränderlich ist. Je schwerer also das Gewicht ist, je mehr muß die Feder im Fall unserer Zeichnung auseinandergezogen werden, so daß ein Zeiger an dem beweglichen Ende der Feder mit der Größe ihrer Verlängerung auch zugleich die Schwere des angehängten Gewichtes angibt (s. die Abbildung, S. 100). Da hier die Schwerkraft mit einer anderen Kraft verglichen wird, die nicht mit unserem Standpunkt auf der Erdoberfläche wechselt, so wird eine Federwage für ein und dasselbe Gewicht einen anderen Ausschlag am Äquator wie am Pol geben, was bei der gewöhnlichen Balkenwage nicht eintritt, weil ja hier die Schwerkraft nur immer wieder mit derselben Schwerkraft verglichen wird. Theoretisch kann man deshalb mit der Federwage dieselben Untersuchungen über die Gestalt der Erde anstellen wie mit dem Pendel, und zur Kontrolle sind dieselben wirklich auch gemacht worden; nur bleiben sie wesentlich ungenauer.

Nicht alle Körper sind elastisch. Wenn wir eine aus Ton geformte Kugel auf eine feste Unterlage fallen lassen, so wird sie zwar ebenso wie der Gummiball eingedrückt, aber sie behält diese Form bei und bleibt gleich beim ersten Niederfallen liegen. Auch sie drückt mit ihrer natürlichen Schwere auf ihre Unterlage, aber es findet nicht jene Spannung zwischen beiden statt, wie wir sie vorhin beschrieben, denn heben wir nun die Kugel von der Unterlage ab, so behält sie ihre deformierte Gestalt auch dann noch bei. Man sagt von ihr, sie sei plastisch. Wie es verschiedene Grade der Elastizität gibt, so lassen sich auch ebenso durch die Größe des Zusammendrucks die Plastizitätsgrade bestimmen.

Aus der Zusammendrückbarkeit der plastischen Körper sehen wir, daß auch sie aus einzelnen Kettengliedern bestehen müssen; nur herrscht zwischen ihnen nicht die Spannung, durch welche wir, nach Analogie der gespannten Saite, die Elastizität erklären. Wir wollen uns jedoch gleich hier darüber klar werden, daß diese Spannung nicht verwechselt werden darf mit der Kraft, welche jene Kettenglieder überhaupt zusammenhält, damit ihre Gesamtheit uns als ein ausgedehnter Körper erscheint. Dieser mehr oder weniger lose Zusammenhang zwischen den einzelnen Teilen eines Körpers nennen wir seinen Festigkeitsgrad. Wir können ihn bestimmen, immer wieder durch die Zugkraft von Gewichten, um alles auf die Einheit der Schwerkraft zurückzuführen, indem wir zwei entgegengesetzte Kräfte so lange verstärken, bis der Körper irgendwo auseinanderreißt. Das alltägliche Leben zeigt, daß diese Festigkeit mit der Elastizität nichts zu tun hat. Ein Seil ist in ungespanntem Zustande nichts weniger als elastisch, aber man muß sehr schwere Gewichte an dasselbe hängen, ehe es zerreißt. Glas ist außerordentlich elastisch, aber es genügt ein geringes Gewicht, um den Zusammenhang seiner Teile zu zerstören. Auch alle Gase sind elastisch, während ihre Teile in fast gar keinem Zusammenhange mehr stehen.


Federwage. Vgl. Text, S. 99.

Wir machen auch die Erfahrung, daß ein und derselbe Körper unter verschiedenen äußeren Einflüssen sehr verschiedene Festigkeitsgrade annehmen kann, wobei sich allerdings auch stets seine Elastizität, beziehungsweise Plastizität ändert, was einen inneren Zusammenhang zwischen diesen Kräften unzweifelhaft macht. Eine eiserne Kugel hat einen bedeutenden Festigkeits- und Elastizitätsgrad unter gewöhnlicher Temperatur. Im weißglühenden Zustand aber wird sie plastisch, und schließlich geht bei weiterer Erhitzung der Zusammenhang zwischen ihren Kettengliedern so weit verloren, daß sie flüssig wird, also gewissermaßen eine maximale Plastizität annimmt. Die betreffenden Eigenschaften des Wassers sind als Eis und als Wasserdampf von dem des gewöhnlichen Wassers wie auch untereinander so grundverschieden, daß man es physikalisch mit ganz verschiedenen Körpern zu tun hat.

Wir wissen, daß nicht nur das Wasser, sondern nach den neueren Ermittelungen überhaupt alle uns bekannten Körper jene drei verschiedenen Aggregatzustände des Festen,

Flüssigen und Gasförmigen annehmen können. Diese drei Zustände sind voneinander scharf getrennt. Unter gewissen Einwirkungen, deren Art uns hier noch nicht interessiert, beginnt in einem bestimmten Augenblicke das Wasser und andere Flüssigkeiten, sich, von einer geheimnisvollen Macht getrieben, zu wundervollen festen Formen, Kristallen, zusammenzudrängen. Nicht minder plötzlich entwickeln sich in der aufkochenden Flüssigkeit Gasblasen, durch welche der Stoff, der bisher durch die Kraft seines inneren Zusammenhanges, relativ genommen, an einem bestimmten Platz gebunden war, sich nun in der Allgemeinheit wieder zu verlieren trachtet, aus der er sich im Laufe des Weltgeschehens hier zusammen gefunden hatte.

4. Die Mechanik der Atombewegungen.

Mit dem Aggregatzustande wechselt auch der Dichtigkeitsgrad. Je dichter ein Körper ist, je mehr Massenteilchen sich also nach unserer auf Seite 68 gegebenen Definition von der Dichte, auf einem gleichen Raumteile zusammendrängen, je geringer ist auch die Beweglichkeit des Stoffes: Flüssiges Eisen nimmt einen größeren Raum ein, ist spezifisch leichter als festes Eisen, Wasserdampf leichter als Wasser. Eine Ausnahme hiervon tritt nur beim Kristallisationsprozeß ein: Eis ist etwas leichter als Wasser in seinem dichtesten Zustande, deshalb schwimmt es auf ihm. Wir können uns diesen Umstand zunächst in durchaus hypothetischer Weise so erklären, daß die bestimmte Gruppierung, welche die Kristallform bedingt, einen größeren Raum erfordert, als wenn diese besondere Bedingung nicht vorhanden wäre und die kleinsten Teile sich so dicht zusammenlegen könnten, wie es ihre übrigen Existenzbedingungen erlauben. Darauf kommen wir später zurück. Sehen wir also von dem besonderen Zustande der Kristallisation vorläufig ab, so können wir uns die Erscheinungen der wechselnden Festigkeit bei trotzdem vorhandener und für unsere menschlichen Fähigkeiten wenigstens unbegrenzter Teilbarkeit der Körper zunächst nur durch die Hypothese erklären, alle Körper beständen aus für uns unendlich kleinen Teilchen, die wir Atome nennen, und die durch gegenseitige Anziehungskraft, ganz ähnlich, wie wir es bei den Weltkörpern wahrnehmen, aneinander gefesselt sind. Wir sehen auch, daß diese Anziehungskraft, wie die der Weltkörper, mit der Entfernung wesentlich abnimmt, da z. B. in den Gasen, die so viel weniger dicht sind als die Flüssigkeiten, aus denen sie entstanden (in denen also die Atome um ebensoviel weiter auseinanderstehen müssen), sich die Atome überhaupt nicht mehr zusammenhalten können, oder doch ihre Anziehungskraft viel geringer ist als die Schwerkraft, welche je zwei solcher Atome, die sich anziehen, ihrerseits wieder auseinanderzieht. In den festen Körpern ist dagegen diese Atomanziehung ganz ungemein viel größer als die allgemeine Anziehungskraft. Ob aber auch die Atomanziehung im Quadrate der Entfernung abnimmt und dann überhaupt vielleicht identisch mit der allgemeinen Anziehung ist, läßt sich an dieser Stelle noch nicht entscheiden. Wir können nur sagen, daß die im vorangegangenen gemachten Wahrnehmungen dieser Annahme nicht zu widersprechen scheinen.

Da es aber in unserer Kenntnis keinen absolut starren Körper gibt, der sich unter keinen Umständen weiter zusammenpressen ließe, so können bei keinem der uns bekannten Körper die Atome sich wirklich berühren, weil wir sie ja durch Zusammenpressen des ganzen Körpers einander noch immer näher bringen können. Außerdem beobachten wir, daß das Zusammenpressen immer mehr Kraft erfordert, je dichter die Körper bereits sind. Diese beiden Umstände scheinen gegen die Annahme zu sprechen, daß die Atome sich wie die Weltkörper in quadratischer Steigerung anziehen. Sobald sie als flüssige und noch mehr als feste Körper einmal in

offenbarem Zusammenhange miteinander sind, sollten sie sich nun von selbst bis zum absoluten Maximum verdichten, indem alle Atome mit zunehmender Gewalt aufeinanderstürzen. Entweder ist also unsere Hypothese falsch, oder wir müssen ihr noch eine Bedingung hinzufügen. Ältere physikalische Ansichten griffen deswegen zu ziemlich verwickelten Anschauungen über den Bau der Atome, die eigentlich nichts erklärten, sondern die mangelnde Erklärung nur um eine Stufe tiefer in das Unsichtbare und Ungreifbare legten. Man gab z. B. den Atomen Atmosphären, deren elastische Wirkung in ihrer unmittelbarsten Nähe nun wieder Abstoßung eintreten ließ. Auch wir müssen hier zunächst eine ergänzende Hypothese zu Hilfe nehmen, die wir aber nach unserem Prinzip, aus dem uns bereits Bekannten Parallelschlüsse zu ziehen, leicht gefunden haben. Geben wir den Atomen Umlaufsbewegungen umeinander, wie wir sie bei den Weltkörpern wahrnehmen, gruppieren wir also die Atome wieder zu größeren Gemeinschaften, die wir im Großen Weltsysteme, im Kleinen Moleküle nennen, so wird es uns unmittelbar klar, daß zwei solcher Systeme sich einander ungestört nähern können, so lange ihre einzelnen Weltkörper bei ihrem Umlauf noch nicht miteinander in Berührung kommen. Wird aber die Bahn der Atome oder Weltkörper in Bezug auf die Größe der letzteren bereits klein, so beginnen die Bahnen einander zu berühren und schließlich zu durchdringen. Die Umlaufsbewegung der Atome im Molekül um ihren gemeinsamen Schwerpunkt wird mit zunehmender Nähe auch mit steigender Kraft ausgeführt. Das System stößt wie ein rotierender Kreisel alles ab, was ihm in den Weg kommt. Es verhält sich dann praktisch wie ein fast vollkommen starrer Körper vom Umfange der Bahn des äußersten Atoms, während doch besondere Umstände diese Bahn noch weiter verengen können. Das ganze System wirkt dabei auf ein anderes, das mit ihm noch nicht direkt in Berührung kommt, wie es der allgemeinen Anziehung entspricht. Es muß sich selbstverständlich erst noch in der Folge unserer Betrachtungen zeigen, ob diese aus dem Vergleich mit den himmlischen Bewegungen abgeleitete Hypothese haltbar ist.

Bei all diesen Betrachtungen haben wir stillschweigend angenommen, daß die Atome selbst absolut starr sind. Sie sollen also eine Eigenschaft besitzen, die wir in der Wirklichkeit nirgends wahrnehmen. Die absolute Festigkeit erscheint uns wie eine Abstraktion. Wir hatten es uns aber von vornherein zur Bedingung gemacht, die Wirklichkeit auch nur aus Beobachtetem zu erklären. Mit dieser Abstraktion hat es jedoch eine ganz besondere Bewandtnis. Bei der Betrachtung der Eigenschaften der Körper bis in ihre letzten Elemente hinein müssen wir diese letzteren doch notwendig als an sich eigenschaftslos annehmen, sonst würden wir uns in einem logischen Kreise drehen und Eigenschaften, die wir erklären wollen, durch unerklärte Eigenschaften ersetzen. Die absolute Festigkeit aber ist keine Eigenschaft mehr, sondern eine ebensolche logische Notwendigkeit für die letzten Raumelemente, wie $1 + 1$ unter allen Umständen 2 und niemals das geringste weniger oder mehr ausmacht. Es bedeutet eben nur, daß da, wo sich zu einer gegebenen Zeit ein Raumelement befindet, nicht zugleich ganz oder teilweise ein zweites sein kann, so daß, wenn ein Raumelement mit einem anderen zusammentrifft, beide eben durchaus nicht mehr und nicht weniger als zwei Raumteile ausfüllen. Diese absolute Festigkeit ist also nicht etwa eine besondere Kraft, wie früher einige Forscher angenommen hatten, die den mit der Zusammenpressung der Körper sich steigernden Widerstand damit zu erklären suchten; denn die Kraft müßte ja, trotzdem sie auf den kleinsten Raum eines Atoms vereinigt ist, unendlich groß sein, weil absolute Festigkeit im Sinne jener Forscher bedeutete, daß sie jeder noch so großen auf sie wirkenden Kraft das Gleichgewicht zu halten im stande sei.

Bereits in unseren einleitenden Betrachtungen (S. 20 u. f.) haben wir unseren Standpunkt in dieser Frage festgestellt, indem wir uns der atomistischen Richtung zuneigten. Bei einer Grenze,

Prinzipien genau zu berechnendem Winkel wieder auseinander, indem sie sich zugleich in Rotation versetzen, die fortan bis in alle Ewigkeit, oder bis ein anderer Zusammenstoß sie ändert, fortdauert. Die fortschreitende Bewegung der Atome verringert sich nach dem Zusammenstoß um einen Betrag, der nötig war, um den Anstoß zur Rotation der Atomkugeln zu geben. Ist nun zwar, wie wir sahen, der extreme Fall der genauen zentralen Berührung unendlich unwahrscheinlich, so wird sich um denselben doch eine große Anzahl von Fällen gruppieren, bei denen diese Bedingung nahezu erfüllt ist, so daß die beiden Atome sehr nahe beieinander bleiben, weil der größte Teil ihrer ursprünglich geradlinigen Bewegung in Rotation verwandelt ist. Wir haben also bei den einfachsten Voraussetzungen mit logischer Gewißheit abgeleitet, daß es erstens einfache und zusammengesetzte Atome geben, und daß zweitens eine gewisse Anzahl von Atomen sich in rotierender Bewegung befinden muß.

Der Zusammenstoß zwischen solchen rotierenden Atomen kann nun zu den mannigfaltigsten Erscheinungen führen, wie wir bei den Bewegungen des Kreisels bereits gesehen haben; aber alle diese Bewegungen lassen sich auf rein rechnerischem Wege voraussagen, wenn man die Elemente der zusammentreffenden Bewegungen kennt. Es ist fortan nur noch die Aufgabe der reinen Mathematik, zu prüfen, ob die beobachteten Zustände der Materie mit den logischen Konsequenzen aus unseren einfachsten hypothetischen Voraussetzungen übereinstimmen.

Wir können in diesem Sinne sogleich einen Versuch mit der Schwerkraft machen. Das Vorhandensein der Weltkörper zeigt, daß ungeheure Ansammlungen von Atomen im Raum existieren, die entweder schon von vornherein vorhanden waren, oder durch Zusammenstöße, wie wir sie oben beschrieben haben, erst nach und nach entstanden. Nehmen wir nun einmal an, eine solche Atomansammlung befände sich in Bezug auf einen bestimmten Punkt in Ruhe. Dann ist damit zugleich bestimmt, daß alle aus dem Weltraume sich gegen jenen Weltkörper bewegenden freien Atome zusammengenommen ihre Wirkung gegenseitig aufheben, denn bei einem Übergewicht von Atomstößen aus einer bestimmten Richtung müßte sich ja der Weltkörper nach der anderen Seite hin bewegen. Von den freien Atomen muß eine bestimmte Anzahl mit Atomen des Weltkörpers zusammenstoßen, während bei weitem die meisten ungehindert durch die Lücken seines Atomgewebes hindurchfliegen mögen. Die ersteren werden von den Weltkörperatomen, die sich in schwingenden Bewegungen befinden, wieder zurückgestoßen, und für diese ist wiederum jede Richtung gleich wahrscheinlich, weil sie aus jeder Richtung kamen. Aber ihre Geschwindigkeit ist geringer als die der noch nicht mit dem Weltkörper in Berührung gewesenen Atome. Es strahlt also von dem Weltkörper nach allen Seiten ein Schwarm von Atomen aus, die geringere Kraft besitzen als der Durchschnitt in diesem Gebiete des Weltraumes, und zwar bemißt sich diese Differenz nach der Anzahl von Atomen des Weltkörpers, von dem sie zurückstrahlen, mit anderen Worten, sie ist seiner Masse direkt proportional. Nehmen wir nun einen zweiten Weltkörper in der Nähe des ersten an. Auch er wird von allen Seiten von Atomstößen getroffen; von der Seite aber, wo sich der erste Weltkörper befindet, geschehen die Stöße mit verminderter Kraft, weil aus dieser Richtung die Atome kommen, welche schon mit jenem in Berührung waren. Deshalb muß der zweite Körper gegen den ersten hingetrieben werden, als ob derselbe ihn anzöge und zwar mit einer Kraft, die direkt proportional seiner Masse ist. Die eine Bedingung der Schwerkraft ist damit erfüllt. Es läßt sich leicht zeigen, daß auch die andere Bedingung der Abnahme im Quadrat der Entfernung unter unserer Voraussetzung erfüllt sein muß. Wir sahen, daß jene zurückgeworfenen Atome von dem Weltkörper nach allen Richtungen ausstrahlen. Dabei müssen sie unter allen Umständen ihre geradlinige, gleichmäßig schnelle Bewegung beibehalten.

Einfluß ihrer eigenen (Tangential-) Geschwindigkeit und anderseits infolge des Uratomstromes, den die Sonne durch ihre bloße Gegenwart in dem allgemeinen Strom erzeugt, ebenso wie in einem fließenden Wasser irgend ein hindernder Gegenstand Nebenwirbel hervorbringt. Alle diese Bewegungen sind ihrerseits für alle Gegenstände auf der Erde gemeinsam und treten deshalb für unsere Experimente auf ihrer Oberfläche nicht in die Erscheinung. Aber die Erde erregt wieder ihren besonderen zentralen Atomstrom, dessen Wirkungen wir als die der Schwerkraft studieren. Die Uratome aller dieser Ströme schnellen beliebig weit in den Weltraum hinaus; alle Ströme durchkreuzen einander. Uratome, welche von Massenatomen der Erde zurückgestoßen werden, erreichen den Jupiter und solche des Jupiter die Erde; beide beeinflussen dadurch gegenseitig ihre Hauptbewegung: Die Planeten stören einander. (S. das „Weltgebäude", S. 595.) Das ist dieselbe Erscheinung, als wenn man neben einer schweren Bleikugel eine aus Holundermark schweben läßt und dann wahrnimmt, daß die letztere von der ersteren angezogen wird (s. S. 71). Die Störungen, welche die Bleikugel in dem Schwerestrom der Erde hervorbringt, führt ihr die leichtere Kugel entgegen. Ganz ebenso muß auch jedes Molekül einer Massenansammlung solche Wirbel um sich erzeugen.

Nach diesen Betrachtungen umgibt uns also ein beständiger dichter Hagel von Uratomen, der alle uns bekannten Gegenstände durchdringt. In einer noch so dickwandigen, allerseits zugeschmolzenen Glasröhre z. B., in welche wir durch uns zu Gebote stehende mechanische Mittel keine Spur irgend eines Stoffes mehr bringen können, fallen die Körper genau so schnell wie im freien Raume. Dies verwundert uns nicht mehr so sehr, seit wir wissen, daß zwischen den Molekülen der uns bekannten Stoffe Zwischenräume notwendig vorhanden sein müssen, um ihre Zusammendrückbarkeit, ihre Elastizität 2c. zu erklären. Die eben gemachte Wahrnehmung zeigt also nur, daß diese Zwischenräume in Bezug auf die Größe der Moleküle klein, in Bezug auf die Uratome dagegen noch immer sehr groß sind. Die Moleküle sind gegen die letzteren wahre Weltkörper. Eine schwache Vorstellung davon, wie ungemein klein jene Uratome sein müssen, mag folgende Betrachtung geben. Man hat gefunden, daß ein Gramm Zucker fein zerrieben durch unsere mechanischen Hilfsmittel sich in etwa 150 Millionen einzelner Zuckerstäubchen zerkleinern läßt. Aber damit haben wir die Grenze eines Zuckermoleküls noch lange nicht erreicht. Diese einzelnen Stäubchen können wir immer noch im Mikroskop sehen. Lösen wir dagegen den Zucker in Wasser auf, so verschwinden die Stäubchen, weil sie sich in noch bei weitem feineren Zerfall in der Flüssigkeit gleichmäßig verteilen. Lassen wir nun diesen Zuckerstaub im scheinbar leeren Raume fallen, so setzt sich sofort jedes der 150 Millionen Stäubchen in die uns bekannte beschleunigte Bewegung. Es wird also sofort von mindestens einem Uratom getroffen. Dieses Experiment zeigt, daß innerhalb des kleinsten noch von uns zu beobachtenden Zeitabschnittes die Masse eines Grammes mindestens von 150 Millionen Uratomen wirklich berührt werden muß. Diese Zahl ist aber unter allen Umständen noch ganz wesentlich zu niedrig gegriffen, einmal, weil jene Stäubchen noch keine Moleküle sind, und dann, weil ja hier nur die Differenz von Stößen in Betracht kommt, welche die Fallbewegung erzeugt; eine große Zahl anderer Stöße muß die kosmischen Bewegungen bewirken, welche der Staub außerdem mitmacht, und nicht minder groß ist die Anzahl von Stößen, die sich gegenseitig aufheben. Welch unermeßlich reiche, vielverschlungene Welt eröffnet sich unseren geistigen Blicken innerhalb dieser molekularen Räume!

Die völlige Unfaßbarkeit der Ergebnisse unserer bisherigen Schlußfolgerungen, die sich aus unbewiesenen, wenn auch noch so wahrscheinlichen Voraussetzungen entwickelten, ermahnt uns

selbst verspüren die Wirkungen jenes Atomregens oft nur zu empfindlich durch den Druck unserer eigenen Schwere.

Ein vergleichendes Bild der Vorgänge, welche sich nach der hier entwickelten Ansicht um ein Molekül abspielen, gibt die Erde mit den täglich millionenfach auf sie einstürmenden Sternschnuppen ab. Die Erde ist das Molekül, jene Sternschnuppen die Uratome. Kommen sie von allen Seiten, so können sie die Bewegung der Erde in ihrer Bahn nicht beinflussen. Die besonderen Sternschnuppenschwärme aber, welche uns gelegentlich begegnen, lenken den Planeten ganz ebenso ab wie ein besonderer Atomstrom, der sich zu dem Hauptstrome gesellt. Durch das Zusammentreffen der nur wenige Gramm wiegenden Sternschnuppen mit der Erde vermehrt sich zwar die Masse der letzteren, während sich die des Schwarmes vermindert, aber die hier in Betracht kommenden Quantitäten sind so gering, daß sie vorläufig praktisch nicht wahrgenommen werden können. Aus demselben Grunde nehmen wir vorläufig diejenigen Korrektionen noch nicht praktisch wahr, die an die uns bisher bekannten Gesetze der Schwere anzubringen sind, wenn die hier entwickelte Ansicht vom Wesen der Schwerkraft richtig ist.

Es würde sich im besonderen zeigen, daß die Körper doch nicht völlig durchsichtig für die Schwerkraft sind, da eine Anzahl von Kraftatomen von den Molekülen festgehalten werden, etwa so, wie das Sonnensystem die aus dem Weltall kommenden Kometen und Meteoriten zu periodischen Kometen, Sternschnuppenschwärmen 2c. umwandelt. Diese kommen dann für die hinter ihnen liegenden Molekularwelten nicht mehr in Betracht. Der beschriebene Vorgang muß ferner eine beständige Vergrößerung der schon vorhandenen Massenansammlungen erzeugen; jeder Körper, das Molekül wie die Sonne, wird beständig wachsen und zwar scheinbar aus sich selbst heraus, da keine uns sichtbar werdenden Massen diese Vergrößerung zu erzeugen brauchen. Ob dies in Wirklichkeit der Fall ist, wird man einmal in kommenden Jahrhunderten sowohl an den Weltkörpern wie an Gegenständen der physikalischen Forschung nachweisen können, so an den mit peinlichster Sorgfalt vor anderen Einflüssen geschützten Urmaßen, die nach Beschlüssen internationaler Vereinigungen in Paris aufbewahrt werden.

In einem begrenzten Teile des Universums, das von allen anderen Teilen desselben völlig abgeschlossen gedacht wird, in welchem also auch nur eine begrenzte Menge von Masse und von Uratomen vorhanden sein kann, findet in notwendiger Konsequenz unserer Annahmen eine beständige Verminderung der Geschwindigkeit aller Massen statt, an deren Stelle andere Bewegungsformen, Rotation, Bahnbewegung um relativ ruhende Massenzentren 2c. treten. Es geschieht eine fortwährende Verwandlung zwischen zwei sehr verschiedenen Erscheinungsformen, die immer nur in einer Richtung gehen kann. Die sogenannte lebendige Kraft oder kinetische Energie der den Raum mit ungeheurer Geschwindigkeit durcheilenden Kraftatome geht allmählich als solche verloren. Sie verwandelt sich in geschlossene Bahnbewegungen, die sich uns im großen als Bewegungen der Himmelskörper in ihren Systemen darstellen, während wir sie im kleinsten Maßstabe bei den Molekülen nur vermuten können. In den Größenverhältnissen zwischen diesen beiden Extremen treten sie nur deshalb nicht auf, weil die Übermacht der Anziehungskraft des Erdkörpers dies verhindert. Könnten die Kanonenkugel, der geworfene Stein oder das Stäubchen ihren Weg ungehindert fortsetzen, so würden sie die vermißten Übergänge bilden.

Wenn nun diese allerkleinsten Bewegungen innerhalb molekularer Dimensionen wirklich stattfinden, dann können sie auch unter Umständen eine für uns sichtbar werdende Arbeit leisten, wie wir sie ja in der Tat bereits bei unseren Versuchen über die Elastizität wahrgenommen haben. Die Kraft an sich ist nicht verloren gegangen; sie hat nur eine andere Form angenommen,

durch welche sie für uns unter gewöhnlichen Umständen unwahrnehmbar wird. Der Physiker hat diesen Zustand, ohne ihn sofort als einen Zustand innerer Bewegung zu erklären, worüber uns erst spätere Untersuchungen Aufschluß geben können, den des „Arbeitsvorrats" oder der „potentiellen Energie" genannt.

In einem völlig von jeder äußeren Einwirkung abgeschlossenen System von Körpern muß also nach unseren Voraussetzungen ein fortwährender Übergang von kinetischer in potentielle Energie, von lebendiger Kraft in Arbeitsvorrat, stattfinden; eine Rückverwandlung ist nicht denkbar. Stellen wir uns nun weiter vor, daß die Bewegungsvorgänge innerhalb der molekularen Weltsysteme denen der Himmelskörper prinzipiell gleich sein müssen, so sehen wir, daß die Bewegungserscheinungen innerhalb einer in sich abgeschlossenen Ansammlung von Kraft- und Massenatomen eine ununterbrochene Stufenleiter durchwandern, indem immer größere Ansammlungen von Massenatomen, beziehungsweise von Weltkörpern, immer langsamere Bewegungen ausführen. Schließlich würde das Ende absolute Ruhe sein, wenn alle Atome sich vereinigt haben. Diese Regungslosigkeit bedeutet den ewigen Tod eines solchen Weltsystems. Schlußfolgerungen dieser Art haben, zwar in anderer Form entwickelt, die wir erst später verfolgen können, den Physikern und Naturphilosophen viel Sorgen gemacht. Wenn jedem einzelnen Teile des Weltalls dieser absolute Tod bevorsteht, so muß auch das Ganze ihm verfallen. Ist aber die Welt schon von aller Ewigkeit her vorhanden, so müßte dieser Zustand notwendig auch heute schon eingetreten sein, was glücklicherweise nicht zutrifft. Etwas stimmt wohl in unseren Schlußfolgerungen nicht.

In der Tat erkennen wir leicht, daß wir gegen unser erstes Prinzip gesündigt haben, keine Voraussetzung in unsere Schlußfolgerungen aufzunehmen, die nicht durch die Wahrnehmung zu kontrollieren ist. Diese Voraussetzung ist die Abgeschlossenheit irgend eines Systems. Es gelingt uns unter keinen Umständen, irgend einen Körper von allen Außenwirkungen abzuschließen. Alle Körper im Weltall beeinflussen alle anderen Körper, das heißt, nach unseren Grundanschauungen: es kommen aus allen unendlich fernen Welträumen Uratome zu uns herüber, von denen unermeßlich viele bereits mit anderen Weltkörpern in Berührung gewesen waren und nun, mit uns in Beziehung tretend, deren Einfluß zu uns herübertragen. Wir sehen mit unseren Riesenfernrohren noch Weltkörper, von denen ein Uratom, wenn es die Geschwindigkeit des Lichtes besitzt, Tausende von Jahren unterwegs ist. Da wir deren Licht unausgesetzt sehen, müssen auch Atome, die von diesem Weltkörper beeinflußt sind, die also eine ununterbrochene Kette von Wirkungen zwischen ihm und uns erzeugen, beständig auf uns herabregnen und ebenso von allen den Hunderten von Millionen Sternen, die in unserer Erkenntnis den Himmel erfüllen. Und noch von unermeßlich weiterer Ferne werden Atome zu uns herüberkommen, deren Wirkungen unsere groben Sinne nicht mehr im einzelnen wahrnehmen. Einen Abschluß gibt es nicht in unserer Erkenntnis. Werden also auch beständig Uratome in Massenatome verwandelt, wachsen auch beständig die Ausdehnungen der Weltkörper und damit ihr Arbeitsvorrat, so nimmt doch deswegen die Anzahl der auf jene wirkenden Uratome, die Größe der lebendigen Kraft, nicht ab.

Was aus dieser Behauptung für eine vollendete Unendlichkeit vor oder nach uns, oder die Unendlichkeit des Raumes abgeleitet werden kann, kümmert uns nicht. Wir wissen, daß wir uns dadurch in Widersprüche verwickeln. Auch dieses Prinzip der Vermeidung des Begriffes der vollendeten Unendlichkeit (s. S. 24) befolgten diejenigen nicht, welche aus der Wahrnehmung, daß wir die eine Energieform nicht in die andere unter allen Umständen zurückführen

können, oder daß es keine wahren Kreisprozesse in der Welt gibt, schließen wollten, die Kraft des Weltalls müsse einmal ein Ende nehmen.

Wir werden nun in den folgenden Kapiteln die Erscheinungen der Materie weiter beobachten und dabei untersuchen, ob unsere aufgestellten Grundanschauungen weitere Bestätigung finden.

5. Die Molekularkräfte und die Aggregatzustände.

Im Vorangehenden haben wir mehr und mehr die Überzeugung gewonnen, daß alle Materie, sei sie nun fest, flüssig oder gasförmig, aus einem Gewirr von festen Körperchen besteht, die sich in den ihnen angewiesenen Räumen bewegen wie die Weltkörper in den Himmelsräumen. Erwägen wir nun, daß die mechanischen Theorien der Weltkörper-Bewegungen, deren Ausbau als der größte Triumph der menschlichen Denkkraft gilt, noch nicht im stande waren, die Wirkung nur dreier Körper aufeinander unter allen Bedingungen vorauszusagen, so wird man es begreifen, welchen Schwierigkeiten die theoretische Physik auf dem Gebiete der molekularen Wirkungen begegnet, wo ganze Milchstraßensysteme von Atomen mit ihren planetarischen Verbindungen der Moleküle in mannigfaltigster Weise ineinandergreifen. Die Kraft der mathematischen Analyse, die nur allein im stande sein wird, über die Beschaffenheit dieser völlig unsichtbaren molekularen Welt sichere Schlüsse zu ziehen, hat kaum die ersten Schritte in dieses Dunkel gewagt, denn nur die uns sichtbar werdenden Gesamtwirkungen dieser zweifellos außerordentlich vielseitigen Welt der Atome bieten uns die Anhaltspunkte für Untersuchungen, die auf unermeßlich viele Einzelwirkungen zurückführen sollen. Wir müssen deshalb in den gegenwärtigen Betrachtungen uns oft darauf beschränken, Gesetzlichkeiten, Zusammenhänge unter den Erscheinungen dieser Gesamtwirkungen aufzufinden, die zunächst mit jenen vermuteten Atomwirkungen scheinbar nichts zu tun haben. Denn in je mehr Einzelheiten wir nun eindringen, je unklarer ist unserer Forschung noch der Zusammenhang der Erscheinungen mit jenen vermuteten Vorgängen in den molekularen Räumen geblieben. Erst eine allgemeine Übersicht der gefundenen Gesetze wird dann später die innere Einheitlichkeit aller Erscheinungen und damit ihre Abhängigkeit von einfachen Wirkungen der Atome wieder nahelegen.

Unter allen Materieansammlungen, die der Physiker untersuchen kann, sind jedenfalls in den Gasen die Bewegungen der Moleküle am freiesten und deshalb am wenigsten verwickelt. Wir werden sie also in den Gasen am besten studieren können.

Zunächst nehmen wir dabei wahr, daß die Gase einen allseitigen Druck auf die Gegenstände, von denen sie eingeschlossen sind, oder die sie umgeben, ausüben. Alle die vielartigen und zum Teil allbekannten Erscheinungen des Luftdrucks beweisen dies. Über uns dehnt sich ein Luftmeer von unbekannter Höhe, das sich ganz allmählich in den sogenannten leeren Weltraum verliert. Aber wir können trotzdem die Schwere einer Luftsäule von gegebenem Querschnitt, die eigentlich erst in dieser Unendlichkeit des Raumes endigt, durch den Druck genau bestimmen, den sie auf der Erdoberfläche oder in einer beliebigen von uns erreichbaren Höhe ausübt. Wir müssen dazu nur den allseitigen Druck der Luft in einen einseitigen verwandeln. Dies tun wir dadurch, daß wir eine genügend lange Glasröhe, die an dem einen Ende zugeschmolzen ist, mit einer schweren Flüssigkeit, sagen wir Quecksilber, vollständig anfüllen, sodaß die Luft aus der Röhre gänzlich entweicht, und nun das offene Ende in ein Gefäß mit Quecksilber tauchen (s. die Abbildung, S. 111). Beim Aufrichten der Röhre weicht die Quecksilbersäule von dem geschlossenen Ende zwar zurück und hinterläßt einen luftleeren Raum, sie wird aber durch den



Ja, die Natur hat es sogar verstanden, mit Hilfe dieses Luftdrucks die Arbeit gewisser Muskeln wesentlich zu erleichtern. Folgende interessante Betrachtung zeigt dies. Da unsere Beine den ganzen übrigen Körper zu tragen haben, mußten sie sehr kräftig gebaut werden und haben deshalb ein beträchtliches Gewicht. Dieses hätten die Sehnen, bez. Muskeln, die das Bein an dem Becken befestigen, bei jedem Schritte vom Boden aufzuheben, wenn jedes Bein für sich allseitig vom Luftdruck umgeben wäre. Nun ist aber der Schenkelknochen mit dem Becken durch ein Kugelgelenk völlig luftdicht verbunden, so daß es trotz freier Beweglichkeit doch im festen Zusammenhange mit dem Becken bleibt, wenn es vom Boden emporgehoben wird (s. die obere Abbildung, S. 114). Seine Last wird somit von dem gesamten übrigen Knochengerüste, beziehungsweise von dem anderen, auf dem Boden befindlichen Bein getragen, und der das freie Bein mit dem Becken verbindende Muskel hat nur noch die zur Bewegung des Beines nötige Arbeit zu leisten, aber nicht noch außerdem seine Last zu heben. Dies ist also die Folge des in diesem Falle nur einseitig von unten wirkenden Luftdrucks, der das Bein gegen die „Pfanne" am Becken drückt (s. die untere Abbildung, S. 114). Man hat die Richtigkeit dieser Überlegung an Leichnamen geprüft. Als man bei einem solchen jenen verbindenden Muskel zerschnitt, blieb das Bein doch am Becken hängen, fiel aber sofort herab, nachdem man ein Loch durch das Becken bis zur Pfanne gebohrt hatte, so daß der Luftdruck nun auch von oben wirken konnte. In entsprechender Weise werden auch die betreffenden Muskeln vom Gewicht der Arme entlastet.



Quecksilberbarometer. Vgl. Text, S. 111.

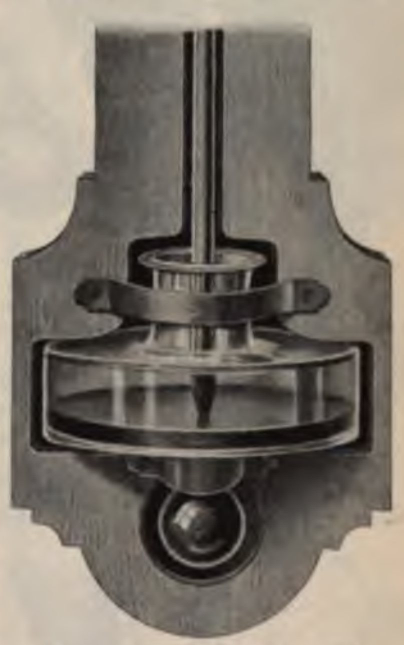
Das oben beschriebene Barometer wurde von dem italienischen Physiker Torricelli erfunden, der bei Gelegenheit der Anlage eines tiefen Brunnens auf den Gedanken zu dieser Erfindung gekommen sein soll, die einer ganzen Wissenschaft, der Meteorologie, das Instrument zu ihren grundlegenden Untersuchungen an die Hand gab. Jener Brunnen war über 30 Fuß tief; man hatte ein Saugrohr hinabgelassen, aber trotzdem die Pumpe tadellos funktionierte, gelang es nicht, das Wasser mehr als 28 Fuß, der Höhe des normalen Standes des Wasserbarometers, emporzuheben. Will man dies erreichen, so muß man dazu statt der Saugpumpe eine Ventilvorrichtung anwenden, durch die das Wasser über den Kolben gelassen und von diesem wie irgend eine andere Last hinaufbefördert wird.

Früher hatte man geglaubt, Gefäße der oben beschriebenen Art blieben von der Flüssigkeit angefüllt, weil die Natur überhaupt nichts Leeres dulde; man hatte das Prinzip des „Horror vacui" aufgestellt. Dieses konnte nicht mehr aufrecht erhalten werden, als man jene Torricellische Leere über der Quecksilbersäule des Barometers entdeckt hatte, die man über den 760 mm so groß machen kann, wie es beliebt, ohne daß sie das Quecksilber deshalb auch nur um ein Geringes höher zu saugen vermöchte. Man hatte hier über dem Quecksilber einen wirklich von wägbarer Materie völlig leeren Raum geschaffen, den man vordem nicht hatte erzeugen können.

Noch ein anderes historisch berühmt gewordenes Experiment zeigt die große Gewalt des allseitig wirkenden Luftdrucks: Die sogenannten Magdeburger Hohlkugeln Otto von Guerickes. Er hatte zwei eiserne, genau aufeinander geschliffene große Hohlkugeln durch eine Luftpumpe innen von der Luft befreit, worauf vorgespannte Pferde nicht im stande waren, die

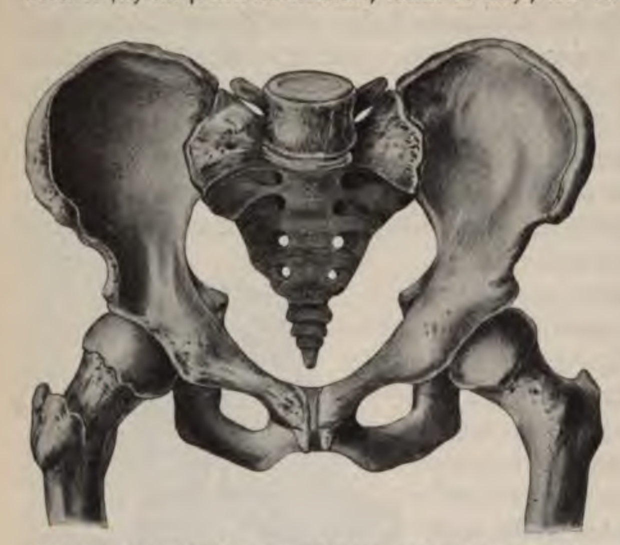
Halbkugeln auseinander zu reißen, die doch von selbst auseinander fielen, sobald man die Luft innen wieder zuließ (s. die Abbildung, S. 115).

Auf der gleichen Wirkung beruht das sogenannte Dosen- oder Aneroidbarometer. Eine flache Dose aus dünnem Blech, b in unserer Abbildung, S. 116, wird luftler gemacht. Der dann noch von außen wirkende Luftdruck biegt die Seiten der Dose ein wie ein Gewicht, das man auf dieselben legen würde. Da das Gewicht der Luft aber veränderlich ist, so wird die Einbiegung der Dosendeckel mit dem Barometerstande schwanken, was durch feine Fühlhebel auf die Bewegung eines Zeigers übertragen wird, der nun den Barometerstand ebenso sicher anzeigt wie die Höhe der Quecksilbersäule im „Gefäßbarometer". Der allseitige Druck der Luft gibt sich auch dadurch augenfällig zu erkennen, daß eine in ihr frei schwebende Flüssigkeit, ein Wassertropfen zum Beispiel, Kugelform annimmt, denn von allen Körpern bietet die Kugel diesem Drucke die kleinste Oberfläche dar. Freilich könnte man erwidern, daß auch im sogenannten leeren Raum alle flüssigen Körper kugelförmig werden und zwar vermöge der inneren Anziehung ihrer eigenen Masse. Nach der bisher verfolgten Anschauung sind aber beide Vorgänge dem Wesen nach dieselben. Die Rundung und Verdichtung der Weltkörper geschieht unter den sie allseitig treffenden Atomstößen, die die Gravitation erzeugen. Man könnte diese Erscheinung also auch als Ätherdruck bezeichnen, wie es geschehen ist. Anderseits müssen wir annehmen, daß der Tropfen in der Luft, oder die Ölkugel in spezifisch gleich schwerem Alkohol, allseitig sie treffenden Molekularstößen der Luft-, bezw. Alkoholteilchen ausgesetzt sind, die diesen Druck als Gesamtwirkung hervorbringen. Wir müssen im Weltäther, in den Gasen, den Flüssigkeiten, ja schließlich sogar in den festen Körpern überall gleichartigen Erscheinungen begegnen, die nur stufenweise durch Nebenerscheinungen verändert oder schließlich auch ganz verwischt werden können, als Folge des immer näheren Aneinanderrückens der Massenteilchen. Jene Nebenerscheinung kann man allgemein als innere Reibung bezeichnen, deren Wirkung überall, auch im Weltäther, wiederzufinden ist. Wie der Nachweis möglich war, daß die Himmelsräume nicht vollkommen durchsichtig sind, man also über eine bestimmte, vorläufig aber noch völlig unermeßliche Grenze hinaus keinen Weltkörper mehr sehen kann, wird auch einstmals gefunden werden, daß die Schwerkraft ihre Grenze hat und daß ihre Wirkung mehr abnimmt, als es das quadratische Gesetz erfordert, weil die Ätheratome auch im freien Raume gelegentlich einander treffen und dadurch ihre Gravitationswirkung schwächen müssen. In den Molekülen der Gase hat sich bereits eine größere Zahl von Ätheratomen zusammengefunden, wodurch sich ihre ursprüngliche ungeheure Geschwindigkeit wesentlich vermindert haben muß. Sie beeinflussen sich jedoch noch nicht gegenseitig, insofern sie noch keine Bahnen umeinander beschreiben. Jedes Gasmolekül hat noch, wie das freie Atom, eine geradlinige gleichförmige Bewegung, soweit es nicht auf seinem Weg einem anderen Molekül begegnet. Versuche beweisen dies:

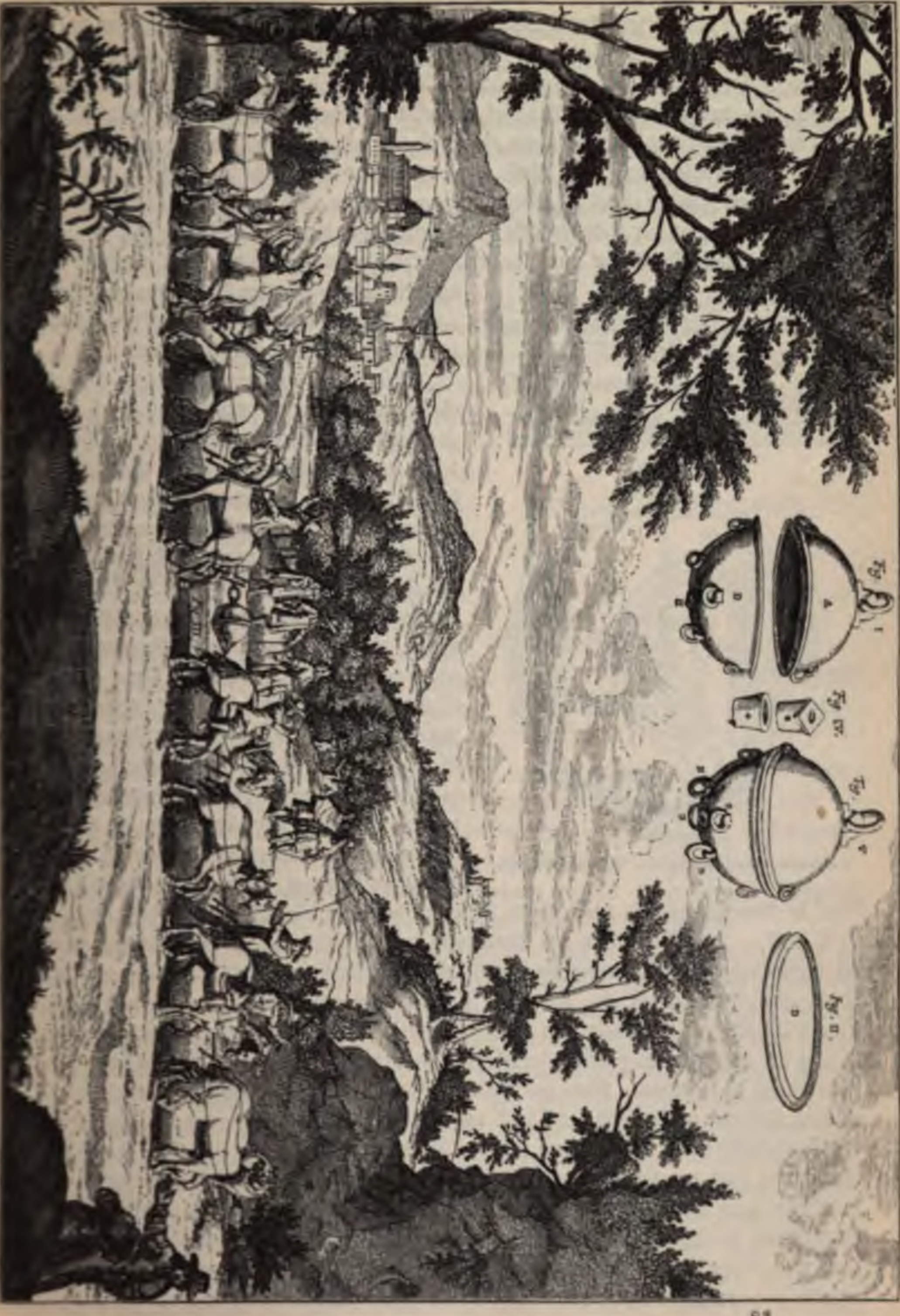


Barometernapf. Vgl. Text, S. 111.

Jedes sich frei überlassene Gas füllt den ihm angewiesenen Raum gleichmäßig aus; es verliert sich im freien Weltraume, wenn es nicht, wie die Atmosphäre, von der Anziehung eines großen Körpers daran verhindert wird. Diese Ausbreitung ist die Folge der geradlinigen Bewegung seiner getrennten Teilchen, die im freien Raume kein Hindernis findet. Deshalb durchdringen sich auch zwei oder mehr Gase vollständig; man sagt, sie diffundieren ineinander, und zwar findet die Diffusion um so leichter statt, je geringer die Dichtigkeit der Gase, beziehungsweise ihr spezifisches Gewicht ist. Dies ist in völligem Einklang mit unserer Grundanschauung. Stellen sich den Bewegungen der Gasmoleküle durch für sie undurchdringliche Gefäßwände Hindernisse entgegen, so werden die Materieteilchen von diesen Wänden zurückgestoßen; reflektiert setzen sie ihren Weg in veränderter Richtung geradlinig fort, bis sie wieder an eine Wand stoßen, und schwirren in dieser Weise beständig in dem Gefäß die Kreuz und Quer. Die auf alle Wände derartig gleich oft ausgeübten Stöße ergeben den allseitigen Gasdruck, den wir vorhin aus Versuchen erwiesen haben. Verkleinern wir den Rauminhalt des Gefäßes, ohne den Gasinhalt zu verändern, so können die Gasmoleküle den kleineren Weg von einer zur anderen Wand des Gefäßes in derselben Zeit öfters zurücklegen als in dem größeren Gefäße; die Stöße wiederholen sich also auch in kürzeren Zeiträumen, und der durch dieselben erzeugte Druck gegen die Gefäßwände muß entsprechend größer werden. Eine leichte theoretische Betrachtung zeigt, daß unter diesen Voraussetzungen die Druckzunahme im genauen Verhältnis zu der Volumenverkleinerung stehen, oder daß der Druck einer bestimmten Gasmenge ihrem Volumen umgekehrt proportional sein muß. Wir haben damit das berühmte Boyle-Mariottesche Gesetz als eine notwendige Folge unserer Grundanschauungen über die Konstitution unserer materiellen Welt erkannt. Dasselbe wird durch die Beobachtung vollkommen bestätigt, wenn wir von extremen Drucken absehen, bei denen Abweichungen hervortreten, die wir bald, genauer betrachtet, als weitere Bestätigungen unserer Ansichten erkennen werden.

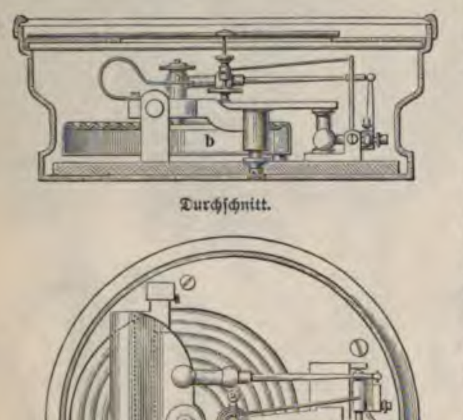

Die durch Luftdruck im menschlichen Becken festgehaltenen Oberschenkel. Vgl. Text, S. 112.


Das Kugelgelenk des Oberschenkels. Vgl. Text, S. 112.



Die Magdeburger Halbkugeln. Nach einem alten Stich. Vgl. Text, S. 113

Es ist nur eine andere Ausdrucksweise des Boyle-Mariotteschen Gesetzes, wenn wir sagen, daß für jedes Gas das Produkt aus seinem Volumen und seinem Druck ein konstanter Wert sein muß. Da wir nun den Gesamtdruck der Atmosphäre durch das Barometer messen, so ist dadurch auch das Volumen der Atmosphäre bekannt geworden. Kennen wir aber die Grundfläche eines Gefäßes und ihr Volumen, so ist es ein einfaches Divisionsexempel, ihre Höhe zu finden. Wir erhalten auf diese Weise die sogenannte virtuelle Druckhöhe der Luft zu 7,99 km. Diese Zahl ist unter der Voraussetzung gefunden, daß die Dichtigkeit der Luft überall die gleiche sei wie an der Erdoberfläche, was bekanntlich durchaus nicht der Fall ist. Deshalb hat diese virtuelle Druckhöhe nur eine theoretische Bedeutung, findet indes vielfache Anwendung in weitergehenden Betrachtungen. In Wirklichkeit hat die wahre Höhe der Atmosphäre einen mindestens zehnmal größeren Wert.



Durchschnitt.

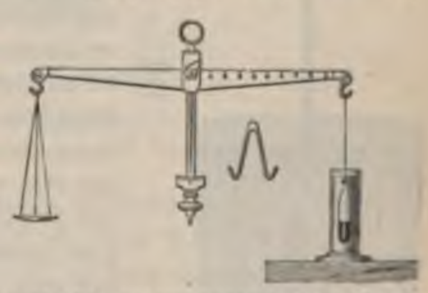
Grundriß.

Naudets Federbarometer. Vgl. Text, S. 113.

Die Größe des Druckes, den ein Gas auf eine Gefäßwandfläche von bestimmter Ausdehnung ausübt, können wir in Grammen durch das Experiment bestimmen. Die Elementargesetze der Mechanik haben uns gelehrt, daß jede Bewegungswirkung sich zusammensetzt aus dem Produkt der Geschwindigkeit (Beschleunigung) und der Masse des bewegenden Körpers (s. S. 77). Hält z. B. ein bestimmter Gasdruck gerade der Bewegung das Gleichgewicht, welche die Schwerkraft einem Grammgewicht erteilen würde, so müssen die den Druck erzeugenden Stöße der Gasmoleküle um so geschwinder stattfinden gegenüber der Schwerkraftbewegung g (s. S. 52 u. f.), als die Zahl der stoßenden Moleküle in einem bestimmten Raume geringer ist als die in dem Gegengewichte, das ihnen die Wage hält. Wir verweisen hierbei auf unseren Vergleich mit dem Eisenbahnzuge, der von einer einzigen Flintenkugel in Bewegung gesetzt wird, wenn diese mit der Geschwindigkeit des Lichtes auf ihn stößt (s. S. 107). Das Verhältnis der Verteilung der Moleküle im gleichen Raume wird aber bei verschiedenen Stoffen durch die Dichtigkeit dieser Stoffe angegeben. Haben wir also den Druck eines Gases gegen eine bestimmte Fläche in Einheiten von g gemessen und kennen wir seine Dichtigkeit, so vermögen wir unserer obigen Betrachtungen zufolge und bei Zugrundelegung der hier vorgetragenen kinetischen Gastheorie die Geschwindigkeit der Moleküle jenes Gases zu berechnen. Man hat auf diese Weise gefunden, daß ein Wasserstoffmolekül sich in einer Sekunde unter normalen Druck- und Temperaturverhältnissen um 1,84 km fortbewegt, ein Sauerstoffmolekül um 0,46 km und ein Kohlensäuremolekül um 0,39 km. Handelt es sich hier immer noch um sehr große Geschwindigkeiten nach menschlichem Maß gemessen, so sind diese doch ganz wesentlich geringer als die der freien Ätheratome, die die Erscheinungen der Gravitation, des Lichtes 2c. hervorbringen. Der Unterschied geht ins Hunderttausendfache. In demselben Maße müssen nach unseren Anschauungen die Ausdehnungen jener Moleküle verschieden sein von denen der freien Ätheratome. Es liegen hier Größenunterschiede vor wie zwischen

Erde und Sonne. Wir sehen hieraus, wie vielfach zusammengesetzt immer noch ein Wasserstoffmolekül oder das der anderen gasförmigen Elementarstoffe sein wird, die doch durch die Methoden der Chemie nicht mehr praktisch teilbar sind. So wenig tief vermögen heute noch unsere praktischen Forschungswege in diese wunderbare Welt der molekularen Himmelskörper einzudringen.

Weitere Betrachtungen und praktische Untersuchungen über die Eigenschaften der Gase führen uns sogar zu Schlüssen über die wahre Größe eines ihrer Moleküle und ihren gegenseitigen Abstand. Wir müssen es uns hier jedoch versagen, diesen Schlüssen zu folgen, die z. B. das Resultat ergaben, daß ein Kohlensäuremolekül zum Durchmesser den vierten Teil eines Millionstel Millimeters hat. Dies ist immer noch etwa tausendmal kleiner als die kürzeste Wellenlänge der Lichtschwingungen, welche die Äteratome zwischen diesen Molekülen ausführen. Der Abstand eines Moleküls von seinem nächsten Nachbar ergibt sich als nur etwa zehnmal größer als sein eigener Durchmesser, wenigstens unter normalen Verhältnissen, d. h. unter dem Druck einer Atmosphäre und bei mittlerer Temperatur. (Wir werden später sehen, daß die Temperatur die Entfernung der Moleküle untereinander in gesetzmäßiger Weise verändert.) Aus den angegebenen Zahlen folgt dann weiter, daß sich unter solchen normalen Verhältnissen im Raume von einem Kubikmillimeter nicht weniger als 58,000 Billionen (58×10^{15}) Kohlensäuremoleküle befinden. Steht ein Gefäß mit Kohlensäure vor uns, so erscheint sein Inhalt uns ein Nichts in seiner Durchsichtigkeit, und doch schwirren so unvorstellbar viele molekulare Sonnen mit ebenso unvorstellbar großer Geschwindigkeit darin umher, und ein Astronom dieser Größenstufe der Materie würde auf einem Himmelsgewölbe von 1 qmm Fläche tausendmal mehr Sterne zählen können, als wir am unermeßlichen Firmament über unseren Häuptern in unseren stärksten Fernrohren sehen. Wenn wir in späteren Betrachtungen uns in dieser Welt noch nicht mit genügender Klarheit zurechtzufinden wissen, so werden wir das angesichts dieses unermeßlichen Reichtums an Materiemittelpunkten, deren Wege zu beherrschen sind, begreiflich finden.



Mohrsche Wage zur Messung des spezifischen Gewichts fester Körper. Vgl. Text, S. 119.

Eine gewisse Gruppe von physikalischen Erscheinungen läßt sich allein durch die bisher gewonnenen Anschauungen von der inneren Beschaffenheit aller Materie erklären.

Wir verstehen es z. B., daß das Boyle-Mariottesche Gesetz von der Proportionalität des Volumens eines Gases mit seinem Druck bei sehr hohen Drucken Abweichungen zeigen muß, von denen wir schon auf Seite 114 sprachen. Die Moleküle rücken unter diesen Umständen so nahe aneinander, daß sie sich bei ihren geradlinigen Wegen häufiger begegnen und dadurch beginnen, die Systeme zu bilden, durch welche bei weiterer Annäherung ihr flüssiger Zustand entsteht. Denn wir wissen ja heute, daß sich jedes Gas verflüssigen läßt, während man noch bis vor einigen Jahrzehnten glaubte, daß einige, die damals sogenannten permanenten Gase, nur in diesem einen Aggregatzustande vorkämen. Diese irrige Ansicht war dadurch entstanden, daß diese Gase allerdings durch Druck allein nicht zu verflüssigen sind, weil sie unter normalen Temperaturverhältnissen sich nur bis zu einem bestimmten Grade zusammenpressen lassen. Die Vorgänge, welche wir als Wärmeschwingungen der Moleküle später kennen lernen werden, setzten von hier ab jedem weiteren Druck ein unüberwindliches Hindernis entgegen. Erst als die Kunst des Experimentierens sehr tiefe Temperaturen zu erzeugen wußte, konnte dies Hindernis

überwunden werden. So verflüssigt sich der Wasserstoff, das leichteste Gas, erst bei einer Temperatur von 234° unter 0 und einem Druck von 20 Atmosphären.

Werden durch Druckerhöhung oder Temperaturerniedrigung die Moleküle eines Gases einander genügend genähert, so beginnen sie sich anzuziehen und umkreisen einander als molekulare Planetensysteme. Moleküle umkreisen einander, wie vorher nur die Atome im Molekül. Die gegenseitige Entfernung der einzelnen Systeme kann dabei groß genug bleiben, daß sie unter äußeren Einflüssen aneinander vorbei können; wir nennen diesen Zustand einen flüssigen. Ist dies Aneinandervorbeischlüpfen bei noch größerer Annäherung nicht mehr möglich, so tritt der feste Zustand ein, wobei nicht zu übersehen ist, daß auch in diesem Zustande die kreisende Bewegung innerhalb der Molekularsysteme nicht aufhört oder an sich überhaupt vermindert zu sein braucht.



Aräometer zur Messung des spezifischen Gewichts von Flüssigkeiten. Vgl. Text, S. 119.

Diese freie Beweglichkeit der Molekularsysteme in den Flüssigkeiten bedingt nun, daß die Druckverhältnisse in ihnen im wesentlichen dieselben bleiben wie in den Gasen. Wir können uns die betreffenden Vorgänge in den Flüssigkeiten am besten begreiflich machen, wenn wir die Molekülsysteme durch eine Menge kleiner Kugeln, sagen wir Schrotkörner, ersetzt denken. Würden sie eine feste Masse bilden, so könnten sie nur auf ihre Unterlage einen Druck ausüben; da die Kugeln aber, wenn auch in geringem Maße, gegeneinander beweglich sind, so wird sich eine Anzahl derselben auch gegen die Gefäßwände legen, gegen diese einen Druck ausüben. Derselbe wird von oben nach unten größer, weil in der obersten Schicht nur ein gewisser Teil des Eigengewichtes der Kugeln seitlich drückt, der andere Teil nach unten, während schon in der zweiten Schicht sich jener Druck der ersten mit dem Gewicht der zweiten vereinigt und so fort. Würden wir das Gefäß in verschiedenen Höhen mit Öffnungen versehen, so würden aus ihnen die Kugeln mit um so größerer Geschwindigkeit horizontal ausgeschleudert werden, je tiefer die Öffnung unter dem Niveau der obersten Kugelschicht liegt. Die nun frei fallenden Kugeln beschreiben dann nach den Gesetzen der Schwerkraft (s. S. 55) Parabeln, aus deren Dimensionen wir die verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten berechnen können. Es ist unmittelbar einzusehen, daß die betreffenden Erscheinungen durch die gegenseitige Reibung der Kugeln sehr gestört werden muß. Aber auch in den Flüssigkeiten sind nach unseren Anschauungen solche innere Reibungen notwendig, und ihr Einfluß ist durch das Experiment nachgewiesen worden. Es handelt sich bei unserem Vergleichsversuche nur um quantitative Verschiedenheiten.

Der Druck in einer Flüssigkeit steigt also von ihrer Oberfläche an mit jeder tieferen Schicht im Verhältnis der eigenen Schwere derselben. Ein von der Flüssigkeit umgebener Gegenstand erleidet demnach einen größeren Druck von untenher als von oben, weil der Druck der Flüssigkeit an seiner unteren Fläche größer ist als an der oberen. Es folgt hieraus das sogenannte archimedische Prinzip, wonach jeder in eine Flüssigkeit eintauchende Körper durch den Auftrieb, welchen er infolge jenes mit der Tiefe zunehmenden Druckes erhält, so viel von seiner Schwere verliert, als Flüssigkeit durch seinen Rauminhalt verdrängt wird. Wir wollen den strengen

Beweis dafür, so elementarer Natur er auch ist, nicht geben, wie wir uns denn im folgenden überhaupt mehr in allgemeinen Anschauungen bewegen werden.

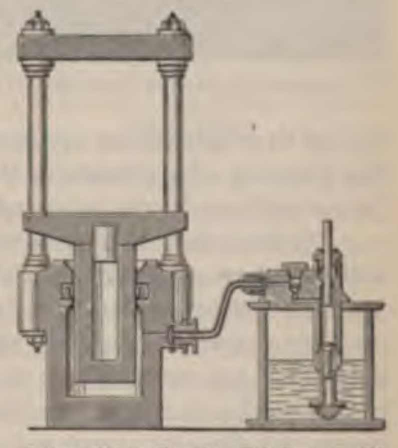
Das archimedische Prinzip gibt ein bequemes Mittel an die Hand, das spezifische Gewicht fester Körper zu bestimmen. Wir brauchen dazu einen solchen nur einmal wie gewöhnlich zu wiegen und dann, mittels einer Vorrichtung, wie sie die Abbildung S. 117 darstellt, noch einmal, während er in Wasser eintaucht. Die Differenz zwischen beiden Wägungen ist gleich dem Gewicht eines Raumteiles Wasser, das genau so groß ist wie der gewogene Körper. Dividieren wir also sein gewöhnliches Gewicht durch diese Differenz, so ist der Quotient sein spezifisches Gewicht. Wiegen wir z. B. ein Stück Eisen von 100 g Gewicht, während es in Wasser eintaucht, so werden wir finden, daß es dabei 13,2 g an Gewicht verliert. Das spezifische Gewicht des Eisens ist also 100:13,2 = 7,6.



Ballon, System Parseval-Siegsfeld. Vgl. Text, S. 120.

Auf dem gleichen Prinzip des Auftriebs beruht auch die Anwendung der verschiedenen Formen des **Aräometers**, das bestimmt ist, das spezifische Gewicht von Flüssigkeiten oder den Grad ihrer Verdünnung zu messen. Ein allseitig geschlossenes und irgendwie beschwertes Glasrohr schwimmt senkrecht in einer Flüssigkeit, von der es um so mehr aufgetrieben werden muß, je schwerer der von dem Rohr verdrängte Teil der Flüssigkeit ist. Eine auf dem Rohr angebrachte Skala, die man an der Oberfläche der Flüssigkeit abliest, kann dann so eingerichtet werden, daß ihre Teilung unmittelbar das spezifische Gewicht der Flüssigkeit angibt (s. die Abbildung, S. 118).

Ist das spezifische Gewicht eines Körpers genau so groß wie das der Flüssigkeit, in der er sich befindet, so ist der von letzterer auf ihn ausgeübte Auftrieb gleich seinem wirklichen Gewicht: der Körper ist schwerelos geworden. Ist dagegen sein spezifisches Gewicht geringer als das der Flüssigkeit, so wird er zu deren Oberfläche emporgetrieben und schwimmt auf ihr. Deshalb schwimmt Eisen auf Quecksilber, während es in Wasser untersinkt.

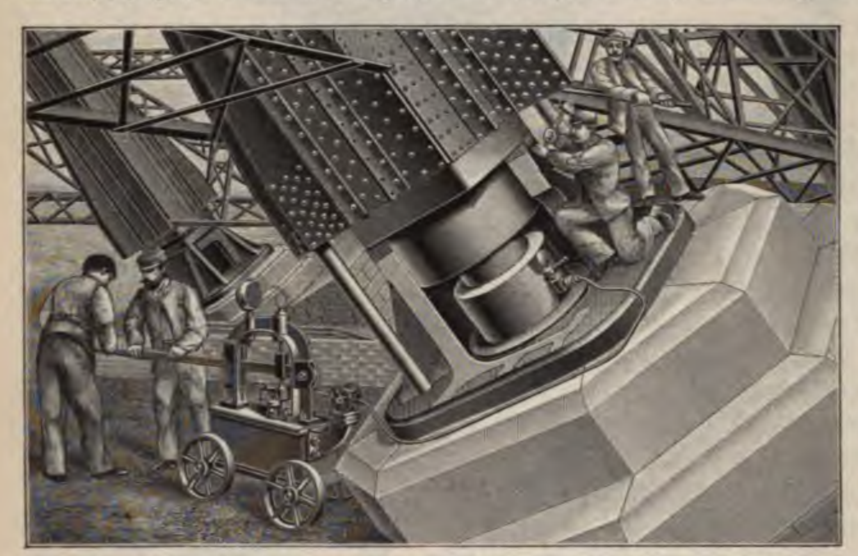


Hydraulische Presse. Vgl. Text, S. 120.

In den Gasen findet natürlich ein entsprechender Auftrieb statt: da Leuchtgas oder noch mehr Wasserstoff spezifisch leichter ist als Luft, steigen damit gefüllte Ballons an der Erdoberfläche in die Höhe, bis sie in Luftschichten gelangen, die so verdünnt sind, daß sie das gleiche spezifische Gewicht besitzen wie jene Gase. Hierauf beruht das Prinzip der Luftschiffahrt (s. die

obere Abbildung, S. 119). Alle Körper müssen deshalb auch im luftleeren Raum um ebensoviel schwerer werden, als die Luft wiegt, welche sie unter normalen Verhältnissen verdrängen.

Die gleichmäßige Verteilung des Druckes in den Flüssigkeiten hat zur Konstruktion vieler technisch wichtiger Einrichtungen geführt. Die Anwendung der **hydraulischen Presse** beruht im besonderen auf diesem Prinzip (s. die untere Abbildung, S. 119). Versieht man ein sonst geschlossenes, mit Wasses gefülltes Gefäß mit zwei Röhren von ungleichem Querschnitt und schließt diese Röhren wieder durch wasserdichte Stempel, so überträgt sich der Druck, welchen man auf den kleineren Stempel ausübt, auf den größeren derart, daß er mit um soviel größerer Kraft herausgetrieben wird, als seine Fläche größer ist als die des pressenden Stempels. Während man also in die kleinere Röhre mit geringer Kraftaufwendung Wasser pumpt, kann man dadurch sehr große Lasten mit dem großen Stempel heben. So hatte man sogar die Grundpfeiler des Eiffelturmes während seiner Konstruktion auf derartige hydraulische Stempel gesetzt, um damit das gewaltige Bauwerk ins Gleichgewicht heben zu können (s. die nebenstehende Abbildung).



Hydraulische Hebung eines Pfeilers des Eiffelturmes. Nach „Le Tour Eiffel“.

Es ist wohl selbstverständlich, daß die größere Last um eine ebensoviel geringere Weglänge gehoben wird, als die pressende Last kleiner ist. Die elementaren Gesetze der Mechanik, wie wir sie z. B. auf Seite 76 als Hebelgesetze kennen lernten, haben auch bei allen verwickelteren Vorgängen unbedingte Gültigkeit.

Die Anwendung der hydraulischen Presse zeigt deutlich, daß das Wasser sich nicht, oder doch nur sehr wenig zusammenpressen läßt. Versuche haben ergeben, daß Wasser bei einem um eine Atmosphäre erhöhten Druck sein Volumen nur um 1 : 20,000 vermindert. Die Tiefen des Meeres reichen bis mehr als 8000 m hinab. Da wir am Wasserbarometer (S. 111) gesehen haben, daß etwas mehr als 10 m Wasserhöhe dem Druck einer Atmosphäre entspricht, so befindet sich das Wasser in jenen Tiefen unter dem ungeheuren Drucke von etwa 800 Atmosphären. Es wird aber dadurch doch nur um 800 : 20,000 = $^1/_{25}$ zusammengepreßt, wie heraufgehobene Wasserproben bestätigten, während mit hinabgelassene Korkstücke wesentlich an Volumen verloren hatten, als sie wieder heraufkamen. Und in jenen Meerestiefen leben Fische, die keine besonderen Schutzvorrichtungen gegen diesen gewaltigen Wasserdruck haben, weil auch er alle ihre Organe allseitig umgibt. Diese Fische besitzen auch Schwimmblasen, deren Luft unter diesem Druck allerdings stark zusammengepreßt wird. Fangen sich diese Fische in den

Schleppnetzen und werden sie mit heraufgezogen, so dehnt sich diese Luftblase bis ins Ungeheuerliche aus und bringt meist den ganzen Fisch zum Zerplatzen, weit bevor er zur Oberfläche gelangt (s. die untenstehende Abbildung).

Wir sehen hieraus, wie sehr verschieden die Verhältnisse der Zusammendrückbarkeit zwischen Luft und Wasser sind. Ganz allgemein lassen sich die Gase innerhalb sehr weiter, die Flüssigkeiten nur innerhalb sehr enger Grenzen zusammendrücken. Aber neben diesem wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Aggregatzuständen findet man zugleich auch merkwürdige Ähnlichkeiten des Verhaltens unter Druck. Zunächst ist der Grad der Zusammendrückbarkeit bei den Gasen sowohl wie bei den Flüssigkeiten im allgemeinen abhängig von der verschiedenen Dichte der Stoffe, also von ihrem spezifischen Gewicht. Wasserstoff läßt sich mehr zusammendrücken als Kohlensäure, Wasser mehr als Quecksilber, Alkohol mehr als Wasser. Unsere Anschauung über die innere Zusammensetzung der Materie gibt hier ohne weiteres die Erklärung. Eine weitere Ähnlichkeit ist die, daß auch die Flüssigkeiten ebensowenig wie die Gase sich allein durch Zusammenpressen in einen höheren Aggregatzustand zwingen lassen. Bei den Flüssigkeiten haben wir hier das Beispiel des Wassers fortwährend vor Augen, so daß es uns bei diesem selbstverständlich erscheint, daß nur die Temperatur es in festen Zustand, d. h. zum Gefrieren bringen kann. In Wirklichkeit aber ist diese Erscheinung sehr merkwürdig; denn wir wissen ja, daß schon bei nur einer Atmosphäre Druck das Wasser von 4° über 0 dichter ist als Eis, daß also dann seine Moleküle sich durchschnittlich näher befinden als im Eise, während sie sich doch im ersteren Falle noch frei bewegen, im zweiten dagegen durch innere Anziehungskräfte fest verbunden sind. Nach unserer atomistischen Anschauung aber sollen ja auch die Moleküle ebenso wie die Himmelskörper sich um so kräftiger anziehen, je mehr sie sich einander nähern. Es müssen also noch besondere Umstände mitwirken beim Übergange der Aggregatzustände ineinander. Für den Übergang vom Gasförmigen zum Flüssigen hatten wir die Hypothese aufgestellt, daß die ursprünglich geradlinigen Bewegungen der Moleküle in kreisende übergehen, wobei sich ihre Bahnen ineinander zu verketten beginnen. Beim festen Zustand tritt noch die geheimnisvolle Erscheinung der Kristallisation hinzu: jeder chemische Stoff vereinigt dabei seine kleinsten Teile in einer ihm eigentümlichen, wunderbar symmetrischen Form. Wir können eine hypothetische Erklärung dafür erst versuchen, wenn wir später noch andere Eigenschaften der Materie kennen gelernt haben.



An die Meeresoberfläche gezogener Tiefseefisch, dessen Speiseröhre und Schuppen infolge des verringerten Luftdrucks herausquellen. Nach Marshall, „Die Tiefsee und ihr Leben“.

Auch die festen Körper zeigen sich noch zusammendrückbar und haben, namentlich bei hohen Drucken, eine Anzahl von Eigenschaften mit den flüssigen gemeinsam. Preßt man ein Stück Eisen stark zusammen, so weichen seine kleinsten Teile nach allen freien Seiten hin aus: sie üben einen vorher nicht vorhandenen Seitendruck (s. die Abbildung, S. 122); setzt man es einem kräftigen Zug aus, so zieht sich ein stabförmiges Stück an den Seiten zusammen, und vorher darauf angebrachte gerade Linien nehmen Krümmungen an, wie sie ähnlich bei strömenden Flüssigkeiten zu beobachten sind (s. die Abbildung, S. 123). Alle festen Körper werden unter

starkem Drucke mehr oder weniger plastisch. Das großartigste Beispiel dafür bieten die gewaltigen Faltungen der Gesteinschichten der Gebirgsformationen. Wir führen hier bildlich eines der bekanntesten Beispiele dafür an, die fast jeder Schweizer Reisende an den romantischen Gestaden des Urner Sees bewundert. Diese ursprünglich wagerecht liegenden Sedimentschichten wurden gegen das Massiv der Zentralalpen gedrängt und dabei zusammengeschoben. Das geschah offenbar ganz langsam im Laufe von vielleicht Jahrhunderttausenden. Die Gesteinschichten sind dabei zu scharfen Ecken umgebogen wie weiche Massen (s. die Abbildung, S. 124). Man hat deshalb früher gemeint, daß eine erhöhte Temperatur eine wichtige Rolle hierbei gespielt haben müsse, doch mit Unrecht, denn man hat in solchen Verwerfungen oft organische Einschlüsse in sonst unversehrtem Zustande gefunden, die nur mit den Schichten in die Länge gezogen oder sonst deformiert waren (s. die Abbildungen, S. 125). Interessant ist auch das Beispiel eines Marmorpfostens in einer Tür der berühmten Alhambra in Granada, die wir auf S. 126 abbilden. Das in Verfall geratene Gebäude verursachte auf diesem Türpfosten einen Druck von ungefähr 1600 kg, offenbar nur ganz allmählich im Lauf einiger Jahrhunderte, wobei der Marmorpfeiler sich um 6 cm ausbog, ohne zu zerknicken, was bei plötzlicher Überlastung sicher geschehen wäre. Man kann also auch die sprödesten festen Körper unter Umständen als in langsam flüssigem Zustande befindlich auffassen, indem sie dabei eine maximale innere Reibung zu überwinden haben.


Durch Pressung plastischer Eisenklotz. Vgl. Text, S. 121.

Eine Anzahl fester Körper teilt bekanntlich die Eigenschaft der Elastizität mit den Gasen und Flüssigkeiten, aber sie ist nicht wie bei den letzteren beiden Aggregatzuständen allgemein bei ihnen. Einige feste Körper sind plastisch, andere biegsam, noch andere brüchig und spröde, kurz, sie zeigen eine Reihe von besonderen Eigenschaften, die sich jedoch unter den verschiedenen physikalischen Verhältnissen, denen sie unterworfen werden, als veränderlich erweisen. So kann das spröde Glas unter Umständen sehr biegsam und auch ungemein elastisch werden. Da die festen Körper zu den verschiedensten technischen Zwecken verwendet werden, ist es für diese von größter Wichtigkeit, die betreffenden Eigenschaften genau zu ergründen. Man bestimmt den Elastizitätsmodul der Körper, ihre Durchbiegbarkeit, ihre Torsionskraft, die elastische Nachwirkung, welche bewirkt, daß die Körper in verschiedenem Grade langsam ihre frühere Form wieder annehmen; man bestimmt die Festigkeit der Körper in Bezug auf Belastung oder Zug, ihre Elastizitätsgrenze, wo sie zerreißen oder brechen, den Widerstand, den sie bei gleitender oder rollender Reibung einander entgegenstellen und so fort. Wir können hier die Mannigfaltigkeit dieser Erscheinungen nicht weiter verfolgen.

Sehr interessant und wertvoll für die allgemeineren Anschauungen über das Wesen der Materie sind dagegen die Wechselwirkungen von Stoffen unter verschiedenen Aggregatzuständen.

Daß zwei verschiedene Gase einander durchdringen, ineinander diffundieren müssen, geht aus unserer Molekularhypothese unmittelbar hervor. Aber sie durchdringen auch ebenso Flüssigkeiten und selbst feste Körper. Der stets beträchtliche Luftgehalt des Wassers bedingt die Existenzmöglichkeit der Lebewesen in ihm, er ist nicht etwa zufälligen mechanischen Beimischungen zuzuschreiben, nach dem Augenschein der Luftblasen, die ein Strudel in das Wasser mit hineinzieht und die allmählich wieder ausscheiden. Luftfreies Wasser saugt Luft in sich auf, ebenso wie es Wasserdampf an die Luft abgibt. Wir erklären dies dadurch, daß die in ihrer geradlinigen Bewegung auf die Wasseroberfläche stoßenden Luftmoleküle in die Zwischenräume der Wassermoleküle wie in einen Schwamm eindringen und festgehalten werden. Ist dies richtig, so muß diese Absorption der Gase durch Flüssigkeiten von der Dichtigkeit der beteiligten Körper abhängig sein. Wir haben uns den Querschnitt durch eine Flüssigkeit wie ein Sieb vorzustellen: es hängt von der Größe seiner Maschen ab, wie viele Körper von bestimmter Größe gleichzeitig hindurchgepreßt werden können. Ein dichterer Stoff wird dasselbe Gas in geringerem Maße absorbieren als ein weniger dichter. Anderseits werden durch dieselben Maschen mehr kleinere Körper dringen als größere. Da aus vielen Gründen, auf die wir zurückkommen, die Ausdehnungen der Moleküle der Stoffe sehr verschieden anzunehmen sind, so werden die Gase auch in sehr verschiedenem Maße von ein und derselben Flüssigkeit absorbiert werden. Dies alles wird durch das Experiment bestätigt. So zeigt es sich z. B., daß die vom Wasser absorbierte Luft ein anderes Mischungsverhältnis zeigt als die gewöhnliche, und zwar enthält sie mehr Sauerstoff, zum Vorteil des Lebens in demselben. Die atmosphärische Luft enthält etwa 21 Prozent Sauerstoff und 79 Prozent Stickstoff (wenn wir von den neuentdeckten Gasen absehen); die beiden Gasmengen verhalten sich also beinahe wie 1 : 4. Analysiert man aber die vom Wasser absorbierte Luft, so findet man sie aus 34 Prozent Sauerstoff und 66 Prozent Stickstoff zusammengesetzt, beide stehen im Verhältnis von 1 : 2, der Sauerstoffgehalt hat sich verdoppelt.



Durch Zug plastisches Eisenstück. Vgl. Text, S. 121.

Sehr überraschend gestalten sich diese gewissermaßen auf einer Durchsiebung beruhenden molekularen Vorgänge zwischen festen Körpern in Berührung mit flüssigen und gasförmigen. Wir tauchen z. B. eine mit einem besonders präparierten Überzug versehene Tonzelle, die man oben geschlossen, aber mit einem Glasrohr versehen hat, in Wasser und sehen, daß sie sich, wenn auch sehr langsam, mit Wasser füllt. Der Überzug ist noch für letzteres durchlässig, seine Sieböffnungen sind für die Wassermoleküle noch nicht zu klein. Nun füllen wir aber die Zelle bis zur früheren Niveauhöhe in dem Wassergefäße mit Zuckerwasser. Der Flüssigkeitsinhalt der Zelle beginnt sich alsbald zu vermehren und steigt in dem Glasrohr über das äußere Niveau empor, und zwar um so mehr, je konzentrierter die Zuckerlösung ist. Um diesen höchst merkwürdigen, als „Osmose" bezeichneten Vorgang zu erklären, müssen wir annehmen, daß die Poren der Zellenwand nicht mehr groß genug sind, um die Zuckermoleküle durchzulassen, oder ihnen doch den Durchgang mehr erschweren als denen des Wassers; es werden mehr Massenteilchen

von dem bloß mit Wasser gefüllten äußeren Gefäße in die Zelle gedrängt als hinaus und dies im Verhältnis der Dichtigkeit, mit welcher die Zuckermoleküle in der inneren Flüssigkeit verteilt sind, weil sie sich im gleichen Verhältnisse weniger leicht bewegen können. Es zeigt sich ganz allgemein, daß stets der osmotische Druck den Dichtigkeiten der beiden in Konkurrenz tretenden Stoffe, Flüssigkeiten oder Gase, proportional ist.

Lehrreich ist hierfür das folgende Experiment. Eine sonst verschlossene Tonzelle a (s. die Abbildung, S. 127) mündet unten in einer Glasflasche, die in einem umgebogenen Rohre r mit einer Spitze endigt und so weit mit Wasser gefüllt ist, daß aus der Spitze davon nichts auslaufen kann. Umgibt man nun die Tonzelle, welche mit atmosphärischer Luft gefüllt ist, mit Wasserstoff oder mit Leuchtgas, das viel Wasserstoff enthält, etwa durch Überstülpen mit einem damit gefüllten Gefäße b, so wird alsbald das Wasser aus der Spitze fontänenartig herausgetrieben; der Druck in dem Tonzylinder erhöht sich: die Wasserstoffmoleküle können seine Wände leichter durchdringen als die der atmosphärischen Luft, es tritt mehr Materie in die Zelle, als gleichzeitig wieder heraustreten kann. Füllt man dagegen die Zelle c mit Leuchtgas, so tritt eine Verdünnung in ihrem Inneren ein, und das Wasser wird in der Röhre emporgezogen, so daß es die kleine Glaskugel d füllt.



Schichtenknickung am Urner See. Nach Photographie. Vgl. Text, S. 122.

Der osmotische Druck spielt eine große Rolle bei vielen physiologischen Vorgängen. Die tierischen Membrane, die Zellwände der Pflanzen, sind solche Siebvorrichtungen, durch die die Auslese derjenigen Stoffe der Umgebung stattfindet, welche die betreffenden Organe für ihre Tätigkeit bedürfen. Die Wurzeln der Pflanzen saugen auf diese Weise mit der Feuchtigkeit des umgebenden Bodens nur diejenigen darin gelösten Stoffe auf, deren sie zum weiteren Aufbau bedürfen, und lassen sie in den Adern der Pflanze ebenso aufsteigen, wie wir die Flüssigkeit in dem Rohr über der mit Zuckerlösung gefüllten Tonzelle steigen sahen; in unseren Lungen tritt die eingeatmete Luft in den feinverzweigten Luftröhren mit dem Blutgefäßsystem nur mit Hilfe des osmotischen Druckes in Wechselbeziehung, indem der Sauerstoff der Luft durch die Gefäßwände in das Blut dringt und von ihm absorbiert wird, während die schwereren Stickstoffmoleküle der Luft nicht oder doch nur in geringerem Maße durchgelassen werden. In jüngerer Zeit haben die Erscheinungen des osmotischen

Druckes in verdünnten Lösungen durch die Untersuchungen van t'Hoffs eine große Bedeutung für die Befestigung der Überzeugung von der Einheit der Naturkräfte gewonnen. Wir kommen bei unseren chemisch-physikalischen Betrachtungen darauf zurück.

Haben wir also im molekularen Verhalten der Flüssigkeiten viele Ähnlichkeiten mit dem der Gase gefunden, die sich im folgenden noch sehr vermehren werden, so ist es doch durchaus überraschend, daß bei näherer Untersuchung sich selbst die festen Körper denselben Gesetzen der Ineinanderbewegung, des osmotischen Druckes, unterwürfig zeigen, wie die beiden anderen Aggregatzustände, nur in quantitativ verschiedener Weise. In jüngerer Zeit (1900) hat W. Spring über das Verhalten von Metallen und Gesteinen in dieser Hinsicht höchst wichtige Untersuchungen angestellt. Er setzte diese Körper einem Drucke bis zu 10,000 Atmosphären aus, indem er gleichzeitig dafür sorgte, daß eine wesentliche Temperaturerhöhung dadurch nicht eintrat. Hierbei zeigte es sich, daß zwei verschiedene Stoffe, z. B. Metalle, die im Schmelzfluß Legierungen miteinander bilden, ineinander völlig diffundierten, sich durchdrangen und so diese Legierungen auch kalt hervorbrachten. Die Durchdringung hatte also nicht etwa nur an den Berührungsstellen stattgefunden. Nun ging man weiter und legte Metallstücke ohne jeden besonderen Druck nur aufeinander und unterwarf sie einer etwas größeren Wärme als die normale, die jedoch weit unter dem Schmelzpunkte der betreffenden Stoffe blieb. Dies sollte nur die Dauer des Experiments abkürzen, weil man weiß, daß die gewöhnlichen Diffusionen durch höhere Temperatur beschleunigt werden. Die Metallstücke blieben so 3 bis 12 Stunden aufeinander liegen. „Die Metallstücke der gleichen Art waren zusammengeschweißt, so daß sie nun ein Stück bildeten; die Verbindungsstelle war nicht mehr sichtbar. Anderseits hatten die Paare verschiedener Metalle sich an den Berührungsstellen miteinander legiert.“ Diese Experimente beweisen auf das Deutlichste, daß auch die kleinsten Teile der festen Körper noch Bewegungen ausführen, durch welche ihre materiellen Systeme einander durchdringen, beziehungsweise sich mit Systemen benachbarter Massen verschlingen.



Durch Druck verzogener Ammonit. Nach Haas, „Sturm- u. Drangperiode der Erde“. Vgl. Text, S. 122.

Bei allen diesen Vorgängen in den meist sehr engen Gefäßen der Organismen spielt noch eine andere molekulare Erscheinung eine wichtige Rolle, die wir als Haarröhrchen-Anziehung (Kapillarität) kennen. Diese ist bei näherer Betrachtung dem osmotischen Druck nahe verwandt, da es sich dabei um teilweise Durchdringung der Oberflächenschichten von zwei verschieden dichten Materien handelt. Wenn man eine enge Glasröhre in Wasser taucht, steigt das Wasser in ihr über das Niveau der umgebenden Flüssigkeit empor, und zwar um so mehr, je enger die Röhre ist. Taucht man dagegen dieselbe Röhre in Quecksilber, so bleibt dasselbe unter dem umgebenden Niveau: Glas übt eine Depression auf Quecksilber aus. Die Folge davon ist, daß das Quecksilber in einer weiteren Röhre eine nach oben gewölbte Oberfläche (Meniskus), Wasser dagegen eine nach unten gewölbte Oberfläche zeigt. Dieser Umstand ist, nebenbei bemerkt, bei den Ablesungen des Quecksilberbarometers zu berücksichtigen, die immer für die oberste Kuppe des Meniskus zu gelten haben.



Durch Druck verzogener Belemnit. Nach Haas, „Sturm- und Drangperiode der Erde“. Vgl. Text, S. 122.

Die alte Schule der Physiker erklärte diese Erscheinungen aus der gegenseitigen Anziehung der verschiedenen Materien, und wir können gleichfalls diese Erklärung gelten lassen, wenn wir

uns nur gegenwärtig halten, was wir nach unseren hypothetischen Anschauungen Anziehung nennen. Wir haben uns vorzustellen, daß die Grenzen der verschiedenen Körper gegeneinander, seien sie nun gasförmig, flüssig oder fest, nicht durch mathematische Flächen gebildet werden, wie sie vielleicht unserem Auge erscheinen mögen. Denn wir haben gesehen, daß auch in den scheinbar festesten Körpern die kleinsten Teile in wohlgeordneten Bahnen sich bewegen. Die von uns wahrgenommenen Grenzflächen bezeichnen nur die weitesten Ausschläge, die jene kleinsten Teile in ihren Bahnen noch ausführen. Wir werden auch hier wieder anschaulicher sein können, wenn wir unsere Parallele mit den Himmelskörpern als Weltatomen aufgreifen. Die Grenzen der Körper bildet eine Reihe von Sonnen, die von Planeten umkreist werden. Ein in einen solchen Sonnenschwarm eindringender Körper kann deshalb schon, weit bevor er in die engere Anziehungssphäre der Sonnen gerät, von einem der Planeten beeinflußt und gezwungen werden, in der Nähe des Schwarmes länger zu verweilen, als es ohne den seinen Weg störenden Planeten geschehen wäre. So hat der Planet Jupiter eine ganze Anzahl von Kometen für unser Sonnensystem eingefangen. (Siehe des Verfassers „Weltgebäude", S. 234.)



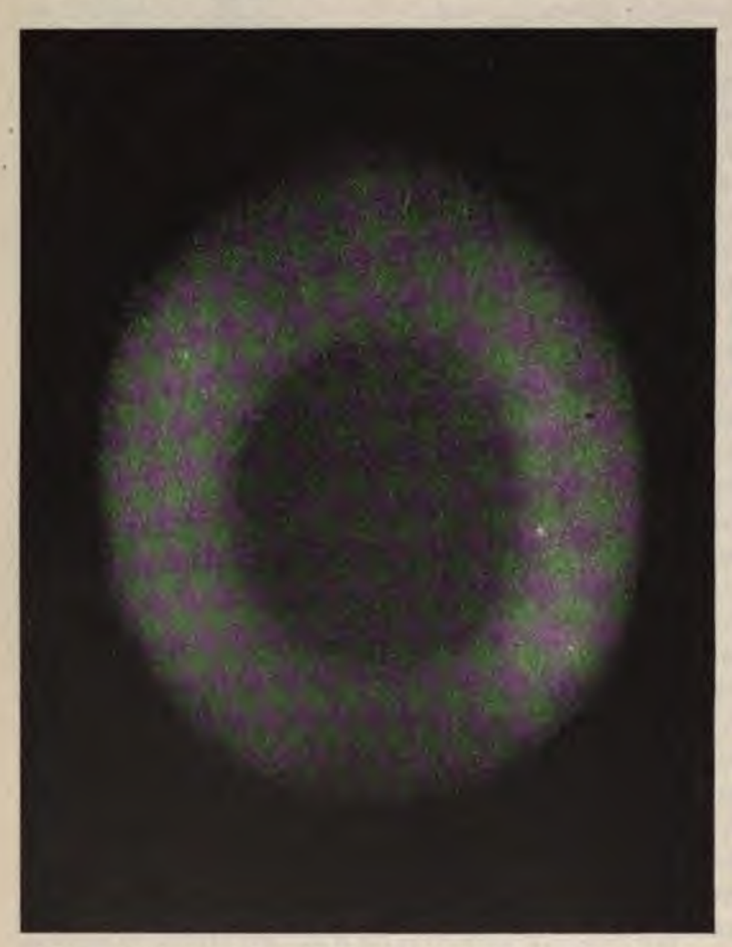
Durch konstanten Druck ausgebogener Türpfosten in der Alhambra. Vgl. Text, S. 122.

So kommt es auch, daß die Wassermoleküle in einer Glasröhre in die Anziehungssphäre der am weitesten ausschwingenden Moleküle des Glases geraten und, scheinbar der Schwerkraft entgegen, durch ihre Eigenbewegung an der Glaswand emporsteigen. Beim Quecksilber dagegen, das schwerer ist als Glas, treten die molekularen Planeten des Glases in den Anziehungsbereich des Quecksilbers. Sie würden wie das Wasser emporsteigen, wenn sie flüssig und das Quecksilber fest wäre. Da sie aber als Teile eines festen Körpers gezwungen sind, um eine feste Mittellage zu schwingen, so stoßen sie, um das Gleichgewicht herzustellen, die flüssigen Quecksilbermoleküle um ebensoviel ab, als sie von ihnen scheinbar angezogen werden. Der Meniskus ist nach oben gewölbt.

Je enger die Haarröhrchen sind, je stärker muß jene scheinbare Anziehungskraft der sich rings zusammenschließenden Röhrenwände werden, je höher kann die Flüssigkeit in ihnen emporsteigen. Auf diese Weise werden die Säfte in den Pflanzen emporgesogen. Ja, es scheint, daß diese engen Gefäße der Organismen noch eine wichtigere Rolle durch ihre molekulare Anziehungskraft spielen. Es ist nämlich in jüngerer Zeit wahrscheinlich gemacht worden, daß die chemischen Vorgänge sich in Haarröhrchen ganz anders abspielen, als wir es in unseren Laboratoriumsgefäßen beobachten, weil eben die freie Beweglichkeit der Moleküle hier gestört ist. Wir werden später sehen, daß bei den chemischen Reaktionen Austausche zwischen den Atomen der Moleküle der verschiedenen miteinander in Berührung gebrachten Stoffe stattfinden müssen. Durch das nahe Aneinanderrücken der Moleküle in den Haarröhrchen werden wahrscheinlich Verbindungen möglich, die bei freier Bewegung sich einander nicht mehr finden können, und es ist kaum ein Zweifel, daß unser Unvermögen, die meisten organischen Verbindungen in unseren Laboratorien herzustellen, in dem Umstande zu suchen ist, daß eben diese und andere Eigenschaften der organischen Gefäße bei unseren Versuchen bisher nicht in Wirksamkeit gebracht werden konnten. Wir kommen darauf zurück, wenn wir die chemischen Eigenschaften der Körper zu behandeln haben.



Diese scheinbare Anziehung zwischen den Molekülen verschiedener Stoffe muß, wie wir gesehen haben, um so bedeutender sein, je verschiedener die Entfernung der Molekularsysteme in den beiden Stoffen, mit anderen Worten, je verschiedener ihre Dichtigkeit ist. Deshalb ist die Annahme berechtigt, daß sie zwischen festen und luftförmigen Körpern noch größer sein wird als zwischen festen und flüssigen. In der Tat zeigt es sich, daß jeder feste Körper mit einer unbeweglichen Schicht von Luft umgeben ist. Wir pressen z. B. zwei genau aufeinander passende Glasplatten zusammen und bemerken, wie sie aneinander haften bleiben. Dies rührt nicht daher, daß etwa die Glasmoleküle einander berührten und sich deshalb gegenseitig so anziehen wie die im Inneren der Glasplatten, sondern es haben optische Untersuchungen erwiesen, daß zwischen den Platten eine sehr dünne Luftschicht von den Glasflächen so festgehalten wird, daß sie keine anderen Luftmoleküle weiter eindringen läßt. Der die beiden Platten also nur noch äußerlich umgebende Luftdruck hält sie deshalb ebenso zusammen wie die Magdeburger Halbkugeln. Ein mit Wasser gefülltes Glas, dem unter der Luftpumpe ein Teil der im Wasser enthaltenen Luft durch Verminderung des umgebenden Luftdruckes entzogen wird, zeigt die Luftblasen zuerst an seinen Wänden, weil diese durch ihre besondere Anziehung mehr Luft festhielten, als sonst vom Wasser absorbiert werden konnte.



Ringnebel in der Leier. Nach Meyer, „Weltgebäude“. Vgl. Text, S. 127.

Da die hier geschilderten Anziehungserscheinungen von den Oberflächen der Körper ausgehen, so müssen ihre Wirkungen auch mit der Größe dieser Oberflächen wachsen. Nun gibt es viele Körper, die bei kleiner Volumausdehnung eine sehr große Oberfläche besitzen, wie z. B. ein Schwamm, der zwischen seinen Poren fast ebensoviel Wasser festzuhalten vermag, als wenn sein Körper von festen Gefäßwänden umgeben wäre. Für luftförmige Körper ist die Kohle ein solcher Schwamm. Hier tritt wegen der Zusammendrückbarkeit der Gase die überraschende

Erscheinung ein, daß die Kohle ein weit größeres Volumen Gas zwischen ihren Poren festzuhalten vermag, als sie selbst besitzt. Bringt man ein Stück Kohle in einen mit dem Zehnfachen ihrer Raumausdehnung mit Kohlensäure gefüllten Zylinder, der unten durch Quecksilber abgeschlossen ist, so wird das ganze Gas absorbiert und das schwere Quecksilber dabei bis zur Kuppe der Glasröhre emporgezogen. Die Kohle wird durch das verdichtete Gas zum Glühen gebracht (s. die nebenstehende Abbildung). Noch an einem weiteren, sehr bekannten Beispiele können wir sehen, wie viel mächtiger diese molekulare Anziehung wirkt, als die allgemeine Schwerkraft: Durch einen besonderen Prozeß kann man Platin in so fein verteilter Form niederschlagen, daß es eine Art von Schwamm bildet. Dieser Platinschwamm übt auf Gase eine so bedeutende Anziehungskraft vermöge seiner großen Oberfläche aus, daß der dadurch erzeugte Druck eine sehr merkliche Erhitzung des Schwammes hervorbringt. Wendet man Wasserstoff an, den man strahlförmig auf den Schwamm leitet, so gerät der letztere bald ins Glühen und entzündet das nachfolgende Gas. Hierauf ist die Konstruktion des früher sehr beliebten Döbereinerschen Feuerzeugs begründet (s. die untenstehende Abbildung).



Gasabsorption durch feste Körper.

Diese molekulare Anziehungskraft zwischen verschiedenen Stoffen, die wir in unserer atomistischen Anschauung als ein Verflechten der verschiedenartigen molekularen inneren Bewegungen auffassen, ist auch die Ursache der sogenannten Oberflächenspannungen, die in der Werkstatt der organischen Natur offenbar eine bedeutende Rolle spielen. Da an der Oberfläche des Wassers die Luft von diesem angezogen wird, so entsteht an derselben eine größere Widerstandskraft gegen das Eindringen eines anderen Körpers, eine Oberflächenspannung, die man gewissermaßen als eine besondere Haut über dem anderen Wasser auffassen kann. Gegenstände, die um den Betrag dieser Spannung schwerer sind als Wasser, schwimmen deshalb trotzdem auf seiner Oberfläche. Ein Tropfen Öl auf Wasser bildet durch den Wettstreit der Anziehung zwischen Wasser und Öl einerseits und Öl und Luft anderseits eine ungemein dünne Ölhaut über der Wasseroberfläche, deren bekanntes regenbogenfarbenes Schillern (Irisieren) die Messung der Dicke dieser Haut auf optischem Wege gestattet und von der Größenordnung der Moleküle selbst ist. Trotzdem hat diese Ölhaut eine so große Widerstandsfähigkeit, daß sie, wie neuerdings durch praktische Versuche nachgewiesen werden konnte, im stande ist, dem Schiffer in der Not des wilden Sturmes Hilfe zu verschaffen. Vermag diese praktisch unmeßbar dünne Haut allerdings nicht die mechanische Kraft der Wogen an sich zu vermindern, so hält sie doch an den Wogenkämmen das Wasser fest zusammen, daß es nicht überschäumen und die für kleinere Fahrzeuge gefährlichen Spritzwellen hervorbringen kann. Gewisse Insekten, die über die Oberfläche des Wassers hinzulaufen vermögen, bedienen sich derselben Spannungserscheinungen



Döbereinersches Feuerzeug.

und werden dabei durch eine Fettabsonderung ihres Körpers unterstützt (s. die untenstehende Abbildung). Es ist ferner sehr wahrscheinlich, daß die Bildung der feinen Häute, die die Zellen und Gefäße der Organismen abgrenzen, wenigstens ihren ersten Anstoß durch diese Oberflächenspannungen erhält. Auch die Seifenblasen entstehen durch dieselbe Wirkung. Schließlich sei noch erwähnt, daß die feste Umgrenzung eines Wasserstrahles in der Luft ebenfalls durch sie bewirkt wird.

6. Die Erscheinungen des Schalles.

Wir haben im vorigen Kapitel (S. 116) gesehen, daß die Moleküle in einem Gase sich mit großer Geschwindigkeit fortbewegen, und daß die Größe dieser Geschwindigkeit von der Art des Gases, bezw. von der Größe seiner Moleküle abhängt. So fanden wir, daß die molekulare Geschwindigkeit des Sauerstoffs 460 m in der Sekunde beträgt. Für atmosphärische Luft ergibt die kinetische Theorie der Gase eine Geschwindigkeit von 280 m unter dem Druck einer Atmosphäre. Selbstverständlich haben wir uns hierbei nicht etwa zu denken, daß ein Luftmolekül, das in einem gewissen Augenblicke sich in unserer Nähe befindet, in der nächsten Sekunde von uns um 280 m entfernt ist. Die Teilchen schwingen vielmehr mit dieser Geschwindigkeit in sehr engen Grenzen hin und her, indem sie fortwährend auf Moleküle in ihrer Umgebung stoßen und von diesen zurückgestoßen werden. Geben wir nun einem Teile solcher Luftmoleküle durch irgend eine mechanische Einwirkung einen besonderen Impuls, so daß sie sich etwas schneller bewegen müssen, so kommen sie mit größerer Geschwindigkeit bei ihren Nachbarmolekülen an, übertragen den Impuls auf diese und werden dafür mit geringerer Geschwindigkeit wieder zurückgeworfen. Ihre mittlere Geschwindigkeit des Hin- und Herpendelns bleibt dieselbe. Durch diese ungleichen Geschwindigkeiten bei der vor- und rückschreitenden Bewegung werden sich infolge jenes Impulses an einer bestimmten Stelle mehr, an einer anderen weniger Luftmoleküle befinden als im normalen Zustande: Der Impuls bewirkt eine Verdichtung und darauf folgende Verdünnung der Luft, die sich mit der Geschwindigkeit der Luftmoleküle fortpflanzt.


Auf Wasser laufende Insekten. Vgl. den obenstehenden Text.

Zur Prüfung dieser aus der Theorie gezogenen Folgerung durch das Experiment schlagen wir eine gespannte Membran, ein Paukenfell, mit einem Schläger. Die Membran wird dadurch plötzlich herausgedrückt, und die sie umgebenden Luftmoleküle werden gezwungen, ihre Bewegung mitzumachen. Die Luft verdichtet sich einen Augenblick auf der einen und verdünnt sich auf der anderen Seite des Paukenfelles. Wir stellen nun in einiger Entfernung ein gleiches Paukenfell auf und lassen eine Kugel an einem Faden so herabhängen, daß die Kugel gerade

die Membran berührt (s. die untenstehende Abbildung). Die sich durch die Luft fortpflanzende Verdichtung drückt dann die zweite Membran ebenso heraus wie die direkt geschlagene und gibt dadurch der Kugel einen Ausschlag. Freilich erfolgt dieser Ausschlag mit geringerer Kraft, als der ursprüngliche Schlag erforderte. Man kann sich davon überzeugen, indem man auch beim ersten Paukenfell den Klöppel an einem Faden befestigt und ihn um einen bestimmten Winkel aus der Vertikalen hebt, um ihn dann auf das Fell herabfallen zu lassen. Der Klöppel am zweiten Fell zeigt einen um so geringeren Winkelausschlag, je größer die Entfernung vom Erregungspunkt ist, und zwar nimmt der Ausschlag im Quadrate dieser Entfernung ab, ganz so, wie wir es bei der Wirkung der Schwere gefunden haben (S. 105), deren Ursache nach unseren Anschauungen ja in prinzipiell gleichen Stoßwirkungen zu suchen ist. Auch muß sich die Wirkung des Stoßes von dem ersten Paukenfell aus rings im Raume gleichmäßig verteilen, denn die ursprünglichen Bewegungen der Luftmoleküle geschehen auch nach allen Richtungen hin gleichmäßig. Alle diese aus unseren allgemeinen Anschauungen geschlossenen Notwendigkeiten werden durch das Experiment bestätigt.


Übertragung der Luftstöße.

Für die Prüfung dieser theoretisch berechneten Geschwindigkeit des Luftdruckes genügt unser Experiment nicht. Wir müssen zu kräftigeren Wirkungen, als es das Anschlagen eines Paukenfelles ist, greifen, da wir bei der Schnelligkeit dieser Übertragung mit großen Entfernungen zu rechnen haben, in denen wegen der quadratischen Abnahme der Wirkung unter solchen Umständen von dieser gar nichts mehr wahrgenommen werden könnte. Hierfür dient uns eine Kanone, die beim Abfeuern durch plötzliche Entwickelung der Verbrennungsgase des Schießpulvers eine so gewaltige Verdichtung der Luft erzeugt, daß wir ihre Wirkung an einem mehrere Kilometer entfernt aufgestellten Paukenfelle durch den oben beschriebenen Ausschlag des Klöppels beobachten können. Die Zeit zwischen dem Aufblitzen des Schusses und dem Ausschlag gibt ein Maß für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit jener Luftverdichtung.

Das Resultat der betreffenden Untersuchung stimmt indes nicht völlig mit der aus der kinetischen Theorie der Gase abgeleiteten Geschwindigkeit der Luftmoleküle von 280 m überein. Wir erhalten dafür 333 m. Experimente zeigen aber, daß diese Luftverdichtungen von Wärmeerscheinungen begleitet sind, die auf jene Ausbreitungsgeschwindigkeit einen bestimmten Einfluß haben, der für Luft unter normalen atmosphärischen Bedingungen derartig ist, daß man die oben benutzte Geschwindigkeit der Luftmoleküle noch mit etwa 1,2 multiplizieren muß. Dadurch ist dann die Theorie auch in diesem Punkte wieder völlig mit der praktischen Erfahrung in Einklang gebracht.

Gleichzeitig mit dem Ausschlag jenes Klöppels an dem Paukenfell auf unserer Beobachtungsstation hören wir einen Knall, ein sogenanntes Schallphänomen. Dieser Sinneseindruck

wird vom Ohr empfangen, in dem sich auch ein Trommelfell und ein Klöppel befinden, die notwendig in ganz gleicher Weise von jener Luftverdichtung beeinflußt werden müssen, wie das Paukenfell (s. die untenstehende Abbildung). Beim Ohrtrommelfell ist der den Klöppel ersetzende Teil der Hammer, der in der Mitte des ersteren festgewachsen und mit einer Vorrichtung versehen ist, durch welche er das Trommelfell immer straff spannt und deshalb möglichst empfindlich gegen jene Druckdifferenzen erhält. Der runde Kopf des Hammers liegt im Amboß, und an diesem wieder ist der sogenannte Steigbügel befestigt. Unter ihm liegt das ovale Fenster, das sich in dem Gehörlabyrinth befindet und wieder aus einer gespannten Membran besteht. Das sonst von knöchernen Wänden gebildete Labyrinth ist ganz mit Flüssigkeit ausgefüllt, in welche Nervenenden in einer besonderen Anordnung auslaufen. Es ist sofort ersichtlich, daß durch die hier beschriebenen Gehörorgane der durch die Luftverdichtung auf das Trommelfell geübte Druck sich durch das ovale Fenster der Labyrinthflüssigkeit mitteilen muß, wodurch dann die Enden der Gehörnerven erregt werden und diesen Eindruck ebenso wie jede andere Berührung dem Zentralnervensystem melden. Über diesen Vorgang haben wir bereits in unseren einleitenden Betrachtungen gesprochen (S. 35).

Trommelfell, Gehörknöchelchen und knöchernes Labyrinth der rechten Seite, vergrößert.

Nachdem wir jene verhältnismäßig einfachen Vorrichtungen in unserem Ohr kennen gelernt haben, sehen wir die Notwendigkeit ein, daß eine plötzliche Luftverdichtung in unserer Nähe einen Sinneseindruck in uns hervorbringen muß, den wir als Schallerscheinung bezeichnen. Es zeigt sich ferner, daß Luftverdichtungen von einer Feinheit durch das ungemein empfindliche Instrument des Gehörs noch als Nervenreize wahrgenommen werden, wie wir sie mit dem Gesichtssinn auch nicht mehr durch Vermittelung der sinnreichsten Vorrichtungen nachzuweisen im stande sind. Es mag auf den ersten Blick verwunderlich erscheinen, daß uns die Natur zum Nachweis von solchen plötzlichen Schwankungen der Luftdichtigkeit ein besonderes Organ gegeben hat. Ohne dasselbe würden uns jene Naturerscheinungen, mit denen wir uns gegenwärtig besonders zu beschäftigen haben, nicht weiter interessieren. Denn sie würden in den Darstellungen der mechanischen Bewegungen der Gase, welche wir früher behandelt haben, eine genügende Erklärung finden. Aber aus der Erfahrung ist uns bekannt, wie notwendig dieses Organ des Gehörs für die Erhaltung und für die Sicherheit der meisten Lebewesen ist. Das Auge kann nur vorwärts blicken, das Gehör aber verrät uns durch ein Geräusch, das fast jede Bewegung, ja das notwendige Atmen schon hervorbringt, die Nähe eines anderen, uns vielleicht gefahrdrohenden Wesens oder Gegenstandes. Es gibt seine Warnungszeichen freilich nur aus größerer Nähe, aber doch von rings um uns her, und ohne daß wir unsere Sinne zunächst so darauf zu richten brauchen wie beim Sehen, das dagegen wieder für größere Entfernungen den Vorzug genauerer Beobachtung genießt.

Dient deshalb das Ohr, wie alle anderen Sinnesorgane, vor allem dem Selbsterhaltungstrieb und ist es diesem Zweck entsprechend eingerichtet, so sehen wir doch neben den recht einfachen Organen im Ohr, die diesen Zweck, ein bloßes Geräusch zu verraten, zu erfüllen geeignet sind, noch Einrichtungen von wunderbarer Feinheit und Vielseitigkeit der Wirkung, die offenbar höheren Zwecken dienen. Zu ihnen gehört die sogenannte Schnecke mit dem Cortischen Organ, das, wie Kölliker angibt, aus 3000 feinen Nervenendigungen besteht, die wie die Saiten eines mikroskopisch kleinen musikalischen Instrumentes eine ganz bestimmt abgestufte Länge haben. Wir können deshalb wohl von vornherein vermuten und werden später die volle Bestätigung dafür finden, daß dieses Organ jene Tonempfindungen vermittelt, die sich von den Geräuschen durch ihre mannigfaltigen Abstufungen und durch ihre unseren Sinnen angenehmen Verschmelzungen unterscheiden. Die sinnliche Auffassung und Unterscheidung solcher besonderen Töne ist bei der wachsenden Vielseitigkeit der Lebensbedingungen, denen die sich immer höher entwickelnde Tierwelt ausgesetzt war, wohl erwünscht, doch keine Notwendigkeit für die Selbsterhaltung. Deshalb fehlen jene feineren Einrichtungen den niederen Tieren. Wir erkennen hieraus weiter, daß unsere Sinne, die für uns zunächst nur Warner vor den umgebenden Gefahren sind, je höher wir in der Entwickelung emporsteigen, um so mehr zugleich auch dazu dienen, uns zu erfreuen. Gerade ihre wunderbarsten und sinnreichsten Erfindungen hat die Natur zu diesem besonderen Zwecke der Freude an den Schönheiten der Naturerscheinungen gemacht, der Freude, die so notwendig wie der Selbsterhaltungstrieb, ja dessen eigentliche Triebfeder ist. So sind also diese Verfeinerungen der Sinnesorgane, die uns auf den ersten Blick unnötig erscheinen, da sie nur einem höheren Genusse des Lebens dienen, mittelbar seine wesentlichsten Erhalter.

Wie kommt nun die Empfindung eines Tones im Gegensatze zu der eines Geräusches zu stande? Um dies beantworten zu können, müssen wir zunächst untersuchen, wie ein musikalischer Ton mechanisch entsteht.

Wir erinnern uns aus unseren allgemeinen Betrachtungen über die Tätigkeit des Nervensystems bei der Auffassung der Sinneseindrücke, daß es einer gewissen Zeit bedarf, bis der von den Sinnesorganen empfangene rein mechanische Eindruck sich auf unser Bewußtsein überträgt. Neuere Untersuchungen, namentlich von Richet, haben gezeigt, daß diese Zwischenzeit für alle Sinneseindrücke, gleichviel von welchem Sinnesorgan sie übermittelt werden, etwa $^1/_{12}$ Sekunde beträgt. Diese Verzögerung ist also nicht etwa eine Folge eines ungenauen Funktionierens der mechanischen Einrichtungen der aufnehmenden Sinnesorgane, die mit dem sogenannten toten Gang bei Schrauben zu vergleichen wäre, sondern sie ist eine Eigenschaft des Zentralorgans unseres Nervensystems. So können wir den genauen Moment des Eintritts jener Luftverdichtung, die den Klöppel von dem Paukenfell hinwegschnellt und zugleich die Schallempfindung in uns hervorbringt, durch einen elektrischen Registrierapparat feststellen und dann finden, daß auch der Gesichtseindruck des sich in Bewegung setzenden Klöppels um diese Zwölftelsekunde dem physikalischen Ereignisse nachhinkt. Würden nun gleichartige Schallerscheinungen jenen Klöppel mehr als zwölfmal in der Sekunde auf und nieder pendeln lassen, so würden wir den Klöppel gar nicht mehr als solchen sehen, sondern einen zusammenhängenden Eindruck von allen seinen Schwingungsphasen im Auge gewinnen; er würde nicht mehr als Kugel, sondern als Teil eines Ringes von der Größe des Pendelausschlages erscheinen. Ganz Ähnliches findet nun bei dem begleitenden Gehöreindrucke statt. Ein auf jenem Trommelfell geschlagener Wirbel, bei dem jeder Trommelschlag vom nächsten um weniger als eine

Zwölftelsekunde getrennt ist, bringt die Schläge nicht mehr einzeln zur Wahrnehmung, sondern ruft die Empfindung eines sehr tiefen Tones hervor, zu welchem sich die Einzeleindrücke vereinigen. Ganz ebenso würden wir, wenn man etwa jenen Trommelwirbel irgendwo auf unserer Haut ausführte, bei Eintritt jener Geschwindigkeit der Aufeinanderfolge die Schläge nicht mehr einzeln, sondern als einheitlichen Druck auf die betreffende Körperstelle empfinden.

Um diesen grundlegenden Versuch für das Zustandekommen eines Tones statt der einzelnen Schallerscheinungen mit größerer Genauigkeit ausführen zu können, bedient man sich der sogenannten Sirene. Sie besteht aus einer Scheibe, die in konzentrischen Kreisen mit Löchern versehen ist, die sich auf jedem Kreis in bestimmter Anzahl befinden. Die Scheibe wird gleichmäßig um ihren Mittelpunkt gedreht, so daß man die Geschwindigkeit dieser Drehung angeben kann. Vermittelst eines Blasewerkes läßt man nun einen feinen Luftstrahl senkrecht gegen die Scheibe strömen, wodurch jedesmal, wenn der Strahl ein Loch trifft, eine gewisse Menge Luft austritt und auf der anderen Seite der Scheibe eine Luftverdichtung hervorbringt. Würden nun in dem einen Umkreise zwölf Löcher sein und die Scheibe gerade in einer Sekunde eine Umdrehung machen, so weiß man also, daß genau zwölf Luftstöße innerhalb dieser Zeit in unser Ohr gelangen, und gerade noch einmal soviel, wenn die Scheibe mit doppelter Geschwindigkeit bewegt wird, und so fort. Dabei zeigt sich in der Tat, daß bei zwölf Stößen die Einzeleindrücke verschwinden und bei 16 ein deutlicher Ton gehört wird. Gehen 24 Löcher in der Sekunde vor dem Luftstrahl vorüber, so tritt ein Ton auf, der dem Subkontra G unserer musikalischen Skala entspricht. Damit treten wir in die Reihe der musikalisch verwendeten Töne ein.

Je mehr wir die Geschwindigkeit der Sirene vergrößern, desto höhere Töne treten auf. Das muß uns zunächst wunderbar erscheinen, denn bei einer entsprechenden Einwirkung auf die anderen Sinne findet scheinbar Ähnliches nicht statt. Wir können nach Belieben die Geschwindigkeit der Gefühlseindrücke auf Teile unserer Haut vergrößern, ohne eine Veränderung des gleichmäßigen Druckes zu bemerken, der bei jener oben definierten Geschwindigkeit beginnt. Erst wenn die letztere sich so weit steigert, daß Wärmeerscheinungen auftreten, würde man beginnen, ähnliche Abstufungen des Wärmegefühls bei verschiedener Geschwindigkeit wahrzunehmen. Ganz ebenso verhält sich der Gesichtssinn. Lassen wir eine blanke Metallkugel genügend schnell hin und her pendeln, so erzeugt der leuchtende Punkt auf der Kugel den Eindruck einer Lichtlinie in unserem Auge, die völlig unverändert bleibt, wie sehr wir auch die Geschwindigkeit der Bewegung steigern mögen. Auch hier gibt es allerdings eine theoretische Grenze. Würde es praktisch ausführbar sein, daß wir die Kugel mit der Geschwindigkeit der Wellenbewegung des Lichtes hin und her schnellen lassen, so würde sie auch eigenes Licht ausstrahlen, das mit der Geschwindigkeit der Kugel ab- und zunimmt. Wir sehen also, daß die Sinnesorgane Abstufungen in der Schnelligkeit der auf sie wirkenden Eindrücke nur innerhalb bestimmter Grenzen wahrnehmen. Zu beiden Seiten dieser Grenzen wird entweder nichts oder nur ein unveränderlicher Eindruck empfunden. Das Ohr ist es, welches in dieser Stufenfolge den Anfang macht. Sein Unterscheidungsvermögen für Abstufungen der Geschwindigkeit aufeinanderfolgender Eindrücke beginnt an der Schwelle, wo die Einzelwahrnehmung derselben soeben aufhört. Durch Verfeinerung unseres Experimentes mit der Sirene kann man dann weiter nachweisen, daß das Ohr aufhört, eine Tonempfindung zu haben, wenn die Geschwindigkeit der Eindrücke sich bis zu 38,000 in der Sekunde steigert. Das Reich der musikalisch verwerteten Töne geht indes im allgemeinen nicht über 3900 Stöße durch Luftverdichtungen hinaus. Dieser höchste Ton wird in unserer Skala als viergestrichenes h bezeichnet. Obgleich wir

bei einer höheren Schwingungszahl als 38,000 keinen Ton mehr hören, können wir doch nachweisen, daß alle jene physikalischen Eigenschaften des Schalles und der Töne im besonderen, von denen wir in der Folge noch zu reden haben werden, auch bei noch wesentlich gesteigerter Frequenz unverändert vorhanden sind. So hat König seine betreffenden Versuche noch bis zu 90,000 Schwingungen in der Sekunde fortsetzen können. Es muß also in unserem Ohr eine Einrichtung vorhanden sein, die innerhalb bestimmter Grenzen auf jede Schwingungszahl in besonderer Weise „anschlägt". Wir haben das Cortische Organ bereits kennen gelernt.

Bei den betreffenden Untersuchungen kommen uns die harmonischen Empfindungen sehr zu statten, die das Zusammenklingen gewisser verschiedener Töne in uns hervorruft, deren Ineinanderverweben in den verschiedensten Mischungen die Kunst der musikalischen Schöpfungen ausmacht, jener Kunst, die die Natur bereits weit vor dem denkenden Menschen erfand, allein nur zur Freude am Dasein für ihre mitlebenden Geschöpfe. Wir wissen, daß wir zu einem gewissen Grundton aus einer beliebigen Zahl von anderen Tönen z. B. die Oktave heraushören, deren Zusammenklingen mit dem Grundton uns eine besonders angenehme Empfindung weckt. Dies Heraushören geschieht mit einer wunderbar großen Sicherheit, so daß gerade eine geringe Differenz weit unangenehmer wirkt als eine größere. Man sagt dann, die Töne sind verstimmt, und welche unangenehme Empfindung man dabei hat, beweist schon das Wortbild, das wir ebenso gebrauchen, wenn unsere Seele durch die Disharmonien des Lebens verstimmt wird.

Die Untersuchung der physikalischen Beziehungen zwischen zwei Oktavtönen etwa mit Hilfe der Sirene zeigt, daß die höhere Oktave immer durch genau noch einmal soviel Schwingungen erzeugt wird wie die zugehörige tiefere. Hat die Sirene zwei Reihen konzentrisch angeordneter Löcher, so daß die eine deren noch einmal soviel enthält als die andere, und setzen wir beide zugleich einem Luftstrahl aus, so werden die beiden erzeugten Töne immer Oktaven sein, wie wir auch durch Veränderung der Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe die Höhe beider Töne verändern mögen.

Die gleiche Wahrnehmung können wir an den Saiten machen, die bei musikalischen Instrumenten Anwendung finden. Beim Anschlagen geraten sie, eine straffe Spannung vorausgesetzt, in bestimmte, durch die allgemeinen Gesetze der Mechanik vorgeschriebene Schwingungen, die sich der sie umgebenden Luft mitteilen und darin ebensolche Verdichtungen und Verdünnungen hervorrufen, wie die Sirene oder das Paukenfell. Unsere Erfahrungen an den betreffenden musikalischen Instrumenten zeigen, daß eine Saite einen um so höheren Ton gibt, einmal, je dünner bei gleichem Material, d. h. je geringer an Masse, dann, je kräftiger gespannt und endlich, je kürzer sie ist. Die vier gleichlangen Saiten einer Violine geben verschiedene Töne, weil sie verschieden stark sind; man stimmt das Instrument, d. h. verändert die Höhe des Tones einer Saite zur anderen, indem man sie straffer spannt oder freier läßt, wie durch Auflegen des Fingers man die Länge der wirksamen Saite verändert. Daß dies so sein muß, haben uns bereits unsere theoretischen Betrachtungen auf S. 95 gelehrt, wo wir für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Welle längs einer Saite den Ausdruck $v = \sqrt{\frac{T}{m}}$ fanden, wo T die Spannung der Saite und m die Masse eines schwingenden Elementes derselben bedeutet. Da eine volle Schwingung nach einem einmaligen Hin- und Zurücklaufen der Welle längs der Saite ausgeführt wird, so müssen wir die Anzahl der Schwingungen, die eine Saite in einer Sekunde ausführt, erhalten, indem wir die oben erhaltene Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch die doppelte Länge der Saite dividieren. Nennen wir diese l, so ergibt sich also die Schwingungszahl $n = \frac{v}{2l}$. Durch diese beiden Formeln können wir die Höhe des Tones

einer gegebenen Saite von vornherein bestimmen. Um Theorie und Praxis miteinander zu vergleichen, bedient man sich des sogenannten Monochords, das unten abgebildet ist. Es ist im wesentlichen ein Metalldraht oder eine Saite aus tierischem Material, an welcher ein Gewicht über eine Rolle befestigt ist, so daß man ihre Spannung durch Hinzufügen oder Wegnehmen von Gewichten verändern kann. Längs der Saite können zwei Klötze, a und b, hin und her bewegt werden, um ihr dadurch verschiedene wirksame Längen zu geben.

Gesetzt, ein gespannter Draht von 1 m Länge brächte bei einer bestimmten Spannung genau das Normal-A der sogenannten französischen Stimmung hervor, so läßt sich ermitteln, daß die Saite 435 Schwingungen in der Sekunde ausführt. Dies ist zunächst nur ein Übereinkommen, wie man die Länge eines Meters, die Größe eines Liters u. s. w. eingeführt hat, um eine allgemeine Gleichmäßigkeit zu erzielen. Die alte deutsche Stimmung nahm 440 Schwingungen für das Normal-A an, steht also etwas höher als die jetzt allgemein angenommene französische. Der Schieber des Monochords, genau auf der Hälfte der Saitenlänge befestigt, läßt nun die Schwingungen, da sonst nichts an der Anordnung des Experimentes geändert worden ist, die halbe Länge der Saite auch in der halben Zeit durchlaufen, d. h. die Saite muß 870mal in der Sekunde schwingen, bei Pariser Stimmung. Genaue Bestimmungen der Schwingungszahl bestätigen dies sowohl wie unser Ohr, das mit vollkommenster Reinheit die Oktave des Grundtons hört. Die nächst höhere Oktave erscheint, wenn die Saite auf ein Viertel ihrer ursprünglichen Länge verkürzt wird; sie macht dann 1740 Schwingungen. Eine Saite von $1/8$ m Länge von der oben angenommenen Art und Spannung endlich macht 3480 Schwingungen in der Sekunde und bringt den Ton a_4 hervor.



Monochord.

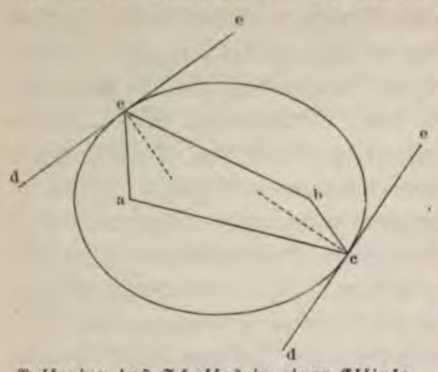
Aber nicht nur zwei im Verhältnis von Oktaven zueinander stehende Töne bringen einen Wohlklang hervor, wir unterscheiden auch noch Quinten, Quarten, Terzen u. s. w. Auch ihre zugehörigen Schwingungszahlen stehen in einfachen Verhältnissen zueinander. Verhielten sich die Schwingungszahlen von Oktaven wie 1:2, so gilt für die Quinte das Verhältnis 2:3, für die Quart 3:4, für die große Terz 4:5, die kleine Terz 5:6 u. s. w. Im gleichen Verhältnis müssen also die Längen von zwei sonst ganz gleichgearteten und gleichgespannten Saiten stehen, wenn sie zusammenschwingend die betreffenden Akkorde rein hervorbringen sollen. Diese merkwürdige Tatsache war bereits zu den Zeiten der Pythagoreer entdeckt worden und überraschte damals so ungemein, daß man in ihr geradezu das Geheimnis der Natur gefunden zu haben glaubte. Hieraus entsprang die erhabene Idee von der Harmonie der Sphären, die bis in die Zeiten der Reformation der Naturkunde hinein die allgemeine Naturanschauung beherrschte und noch einen Kepler begeisterte, die wahren Gesetze der himmlischen Bewegungen zu suchen, die er aus ebenso einfachen Zahlenverhältnissen glaubte ableiten zu können. Es drückt sich hier ein erstes Vorahnen von der großen Einheit des Naturgeschehens aus, die auch uns noch geheimnisvoll ist wie den Pythagoreern, und die auch wir heute, allerdings nicht in Verhältnissen einfacher Zahlen, doch einfacher mathematischer Ausdrücke als Naturgesetze zu erkennen trachten. Auch wir wissen heute noch nicht, wie es kommt, daß gerade solche einfache Beziehungen der Schwingungszahlen uns Wohlgefallen erwecken, aber wir sind überzeugt, daß dieses Wohlgefallen aus dem alldurchdringenden Streben der ganzen Natur nach Einheit und Ordnung entspringt.

Bei allen den musikalischen Instrumenten, welche eine fortlaufende Skala von unveränderlichen Tönen besitzen, wie z. B. beim Klavier, war es nicht möglich, den Quinten, Quarten u. s. w. eine reine Stimmung zu geben, wenn man die Oktaven rein halten wollte. Suchen wir z. B. zu dem Grundton a mit 435 Schwingungen die reine große Terz mit $^5/_4$ dieser Schwingungszahl, so erhalten wir 543,8, welche also dem reinen Geigenton cis entspricht. Suchen wir nun zu cis als Grundton wieder die große Terz, so erhalten wir 679,8 Schwingungen für diesen Ton, der in der gebräuchlichen Tonleiter mit f bezeichnet wird. Dieses f steht aber mit dem Grundton a in dem Verhältnis einer sogenannten kleinen Sexte, die in reiner Stimmung $^8/_5$ der Schwingungszahl des Grundtons haben müßte: das macht 696 Schwingungen aus. Es tritt hier also eine Differenz von über 16 Schwingungen für f auf, je nachdem wir ihn von a oder von cis als Grundton ableiten. Solche Differenzen würden für alle anderen Töne ebenfalls auftreten. Es mußte somit für die Instrumente mit fester Stimmung eine gleichmäßig fortschreitende Skala erfunden werden. Bei dem so entstehenden temperierten Klavier bleiben nur die Oktaven im genauen Verhältnis von 1 : 2; für die Quinte dagegen nimmt man das Verhältnis 2 : 2,997, für die Quarte 3 : 4,004, für die große Terz 4 : 5,039 u. s. w. Man hat dabei die Abweichungen von den genauen Verhältniszahlen um so geringer gelassen, je einfacher diese Verhältnisse sind, weil das Ohr bei diesen am leichtesten eine falsche Stimmung wahrnehmen würde.

Wir sahen, wie die Schwingungen der Saiten die Luft in Wellenbewegungen versetzten. Schon bei der Besprechung der allgemeinen mechanischen Bewegungsprinzipien trat eine Anzahl von Eigenschaften der Wellenbewegung auf, die deshalb bei den Schallerscheinungen wiederkehren müssen, wenn unsere Grundanschauungen von der Materie richtig sind. Unsere Erfahrung lehrte, daß die Schwingungen reflektiert, zurückgeworfen werden und sich dann mit folgenden Wellenzügen so verbinden, daß Knotenpunkte, stehende Wellen und sogenannte Interferenzerscheinungen auftreten. Zeigen die Wirkungen des Schalles entsprechende Eigenschaften?

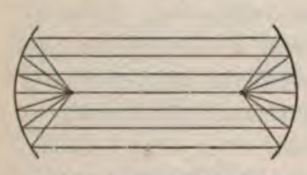
Daß der Schall zurückgeworfen wird, weiß jedes Kind, das einmal ein Echo gehört hat. Die durch unsere Stimme erzeugten Schallwellen pflanzen sich bis zu einer Wand, einem Waldsaum oder einem anderen ihrer Ausbreitung hinderlichen Gegenstand aus und kommen von ihm in unveränderter Gestalt nach einer Zeit zurück, die der Geschwindigkeit von 333 m in der Sekunde entspricht. Wir unterscheiden auch oft ein mehrfaches Echo, das meist dadurch entsteht, daß der Schall von einem Gegenstande wohl zunächst zu uns zurück, aber auch zugleich einem anderen Hindernisse zugeworfen wird, dessen Lage zu uns und dem ersten Hindernis sich so verhält, daß sie dem Grundgesetze der Reflexion, der Gleichheit des Einfalls- mit dem Ausfallswinkel entspricht (s. S. 99). In sehr interessanter Weise bestätigt sich das Gesetz bei dem sogenannten Ohr des Dionysos, einer Grotte bei Syrakus. Dieselbe bildete ein ellipsoidisch geformtes Gewölbe, wie auch das Mormonentabernakel in Salt Lake City. Was man in dem einen Brennpunkte desselben flüstert, hört man so deutlich in dem anderen, als wenn es hier gesprochen würde, während man in zwischenliegenden näheren Punkten nichts hört. Der Grund hiervon liegt in einer geometrischen Eigenschaft der Ellipse. Wenn man nämlich von jedem ihrer Brennpunkte, a und b, je eine Linie nach ein und demselben Punkte, c, ihrer Peripherie zieht, so bilden diese beiden Linien, ac und bc, immer den gleichen Winkel, dca = ecb, zu der Tangente de, welche man an die Ellipse in jenem Peripheriepunkt legen kann (s. die obere Abbildung, S. 138). Durch diese Bedingung wird also zugleich das

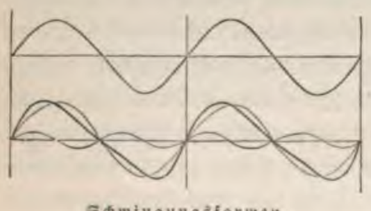
Reflexionsgesetz erfüllt, und alle Schallstrahlen, die von dem einen Brennpunkt ausgehen und sich an den Wänden des elliptischen Gewölbes brechen, müssen in dem anderen Brennpunkte deshalb wieder zusammentreffen, d. h. ihre Wirkung vereinigen. Das Experiment pflegt in physikalischen Kabinetten in etwas veränderter Form durch zwei parabolische Spiegel wiederholt zu werden. Alle Strahlen, die von einem bestimmten Punkte vor einem solchen Spiegel diesen treffen, gehen vermöge seiner geometrischen Eigenschaften von ihm parallel weiter; man kann sie also in einer beliebigen Entfernung durch einen zweiten Parabolspiegel auffangen, durch welchen sie sich dann ebenso in einem Punkte wieder vereinigen müssen (s. die mittlere Abbildung). Eine in dem einen Punkt aufgehängte Taschenuhr läßt ihr Ticken in dem anderen Punkte fast so gut hören, als hielte man die Uhr direkt ans Ohr, während man nichts mehr hört, wenn man das Ohr auch nur ein wenig von jenem Punkt entfernt.



Reflexion des Schalles in einer Ellipse. Vgl. Text, S. 137.

Als wir uns auf S. 96 mit den Schwingungen gespannter Seile beschäftigten, haben wir die Entstehung von Knotenpunkten durch Reflexion der Wellen an den festen Enden des Seiles beobachtet. Das Gleiche muß auch bei einer schwingenden Saite eintreten. Wenn man sie nicht mit mathematischer Genauigkeit so anschlägt, daß sie zwischen ihren festen Enden keine anderen Bewegungen als die ihrer Schwingungszahl entsprechenden ausführen kann, so treten Nebenschwingungen auf, die kleiner sind als die Hauptschwingung und also von den Enden reflektiert Knotenpunkte auf der Saite erzeugen. Der Zustand einer schwingenden Saite ist vergleichbar dem Durchschnitt einer Meereswoge, auf deren Bergen und Tälern man viele kleinere Wellen als Kräuselungen bemerken kann. Wir verstehen dabei wohl ohne weiteres, daß die Eigenschaften dieser Nebenschwingungen von der Art der schwingenden Körper abhängt. Die verschiedene Verteilung der so entstehenden Knotenpunkte in dem tönenden Körper bedingt dasjenige, was wir die Klangfarbe des betreffenden musikalischen Instrumentes nennen. Die Nebenschwingungen bringen die sogenannten Obertöne hervor. Eine Saite kann z. B. noch doppelt so viele und zugleich auch noch dreimal so viele Schwingungen neben ihrer normalen ausführen, die dann, wie das nebenstehende Diagramm zeigt, entsprechend geringere Ausschläge machen. Man muß neben dem Grundton noch seine nächst höhere Oktave, wenn auch erheblich schwächer, und eine noch schwächere Quinte zum Grundton hören. Dieser Zusammenklang gibt der Saite ihre individuelle Klangfarbe. Die Nebenschwingungen werden an bestimmten Stellen die Hauptschwingung verstärken, an anderen schwächen. Wir können das bildlich darstellen, indem wir die in unserer Zeichnung ineinander geschlungenen Wellenlinien zu einer vereinigen, wie wir es oberhalb getan haben. In dieser Form muß die Saite dann wirklich schwingen.


Reflexion im Hohlspiegel.


Schwingungsformen.

In der Tat finden wir dies durch ein Instrument bestätigt, das in neuerer Zeit zu einer großen Popularität gelangt ist, durch den **Phonographen**, den Tonschreiber (s. die untenstehende Abbildung), der durch den erfindungsreichen **Edison** (s. die Abbildung, S. 140) zu seiner größten Vollkommenheit gebracht wurde. Er besteht im wesentlichen aus einer elastischen Membran, die aus verschiedenen Stoffen hergestellt zu werden pflegt, aus dünnen Metallplättchen, aus Glas, Glimmer u. s. w. In der Mitte dieser Membran ist ein hohlkugelförmiges Messerchen angebracht. Membran und Messerchen sind zu vergleichen mit dem Ohrtrommelfell und seinem Hammer. Das Messerchen schleift mit sanftem Druck über einer rotierenden Walze hin, die einen Paraffinüberzug besitzt, in die durch das langsam seitlich bewegte Messerchen eine spiralige Rinne gegraben wird. Diese Rinne wird immer die gleiche Tiefe haben, solange der Druck, den das Messerchen auf die Walze übt, der gleiche bleibt. Sobald aber durch die auf sie wirkenden Schallwellen die Membran in Schwingungen versetzt wird, muß das Messerchen diesen entsprechend größere oder geringere Vertiefungen in die Paraffinwalze graben. Ersetzt man nun dieses hohlkugelförmige Messerchen durch eine Kugel von gleichem Durchmesser und läßt diese über die vorher von dem Messer gemachten Vertiefungen hingleiten, so versetzt diese Kugel die Membran wieder in dieselben Schwingungen, wie die, welche die Vertiefungen hervorgebracht haben. Sie teilen sich der Luft und unserem Trommelfell mit, als ob diese Schwingungen von der ersten Tonquelle verursacht worden wären. Man kann durch ein solches Instrument Schallschwingungen jeder Art fixieren und nach beliebiger Zeit wieder für unser Ohr in Wirksamkeit versetzen.



Phonograph.

Die Untersuchung der Form der Vertiefungen in der Walze zeigt, daß diese durchaus jenen Wellenlinien entsprechen, wie wir sie oben aufgezeichnet haben. Auch das Ohr unterscheidet ja in der Wiedergabe des Phonographen sehr deutlich die Klangfarbe der verschiedenen Instrumente; es hört, ob ein Musikwerk auf einem Streich-, einem Blech- oder einem Holzinstrument gespielt wurde, weil jede Kategorie von Musikinstrumenten durch eine andere Verbindung von Obertönen gekennzeichnet ist. Aber jeder Besitzer eines Phonographen wird zugleich auch erkannt haben, daß der Apparat doch nicht in allen Fällen die Klangfarbe genau wiederzugeben vermag. Sie zeigt eine Beimischung, die man als blechern und in den oberen Tönen schrill empfindet. Man hat vielfach geglaubt, daß dies an der Form oder Beschaffenheit

der Schalltrichter liegen müsse, durch welche man die Tonschwingungen verstärkt auf die Membran oder von derselben zurückkommen läßt. Man vermutete also, daß diese Schalltrichter besondere Obertöne erzeugten. Aber die ungenaue Wiedergabe liegt hier offenbar nicht in Wirklichkeit an einer Beimischung, sondern an einem Mangel. Nicht alle die feinen Schwingungen der Obertöne, die das Ohr noch mitempfindet, vermögen sich auf der Walze einzugravieren. Man bedenke nur, daß das Phonographenmesserchen bei den höheren Tönen tausend und mehr Vertiefungen in der Sekunde auszugraben hat und dabei diese Wellenlinien noch mit den äußerst feinen Kräuselungen der Obertöne versehen soll. Es ist wahrlich bewundernswürdig genug, daß es unsere modernen Mechaniker vermocht haben, eine so feine Maschine zu konstruieren, wie den Phonographen. Deshalb ist es auch begreiflich, daß er namentlich bei den höheren Tönen versagt, weil für sie jene in das Wachs zu grabenden Wellen am kleinsten sind. Auch daß die Klangfarbe im allgemeinen blechern wird, ist verständlich, wenn wir erfahren, daß die Blechinstrumente verhältnismäßig wenig Obertöne hervorrufen.



Th. A. Edison. Nach Photographie. Vgl. Text, S. 139.

Ein mit dem Phonographen anzustellendes Experiment ist für uns lehrreich. Wenn man nämlich bei der Wiedergabe eines Tonstückes die Walze des Apparats schneller oder langsamer gehen läßt als bei der Aufnahme, so wird dadurch seine ganze Tonlage höher oder tiefer, ohne daß die Harmonien der Tonschöpfung dadurch in irgend einer Weise beeinträchtigt würden; wir können das Stück nur durch die Veränderung der Walzengeschwindigkeit vollkommen richtig auf eine beliebige Tonlage transponieren. Wir verstehen dies sofort, wenn wir uns erinnern, daß die Harmonien ja nur durch relative Zahlenbeziehungen hervorgebracht werden. Lassen wir die Walze noch einmal so schnell gehen, so wird das ganze Tonstück eben auch genau um eine Oktave gehoben. Wir haben hier keine andere Erscheinung vor uns als die bereits bei der Sirene beobachtete. Wir erkennen hieraus aber auch gleichzeitig, wie wichtig es ist, daß die Phonographenwalze immer eine möglichst vollkommen gleichmäßige Geschwindigkeit hat, weil sonst ein noch so rein gespieltes Tonstück unrein wiedergegeben werden muß, wenn durch die Ungleichheit der Bewegung die Schwingungszahlen nacheinander auftretender Töne ihre harmonischen Zahlenbeziehungen zueinander verlieren.

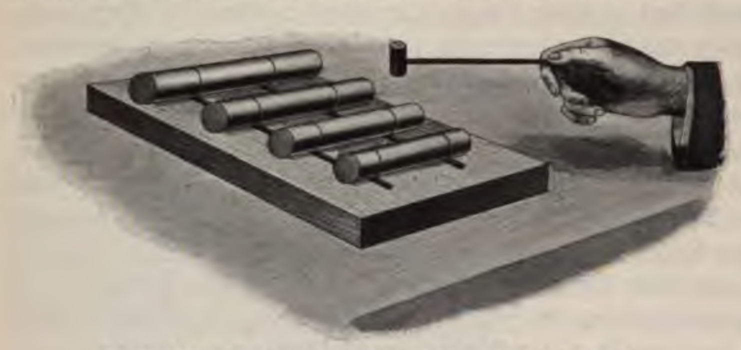
Das Vorhandensein von Obertönen kann man auch noch durch eine andere wichtige Erscheinung auf dem Gebiete der Schallerscheinungen nachweisen, durch die sogenannte Resonanz. Um ihre Wirkung zu schildern, greifen wir auf unser Grundexperiment mit dem Paukenfell zurück, das angeschlagen eine Luftverdichtung erzeugt, durch welche ein anderes Paukenfell in gleiche Bewegung versetzt wird. Ebenso werden auch die von schwingenden Körpern erregten Luftwellen alle anderen sie umgebenden Körper in eine gleiche Bewegung zu versetzen

trachten: die Luft führt ja direkte Stöße auf sie aus. Mächtige Orgeltöne lassen alles ringsumher erdröhnen. Wegen der entsprechend geringeren luftbewegenden Kraft anderer Töne werden allerdings die Erschütterungen unter gewöhnlichen Umständen bald völlig unmerklich. In bestimmten Fällen aber müssen sich diese kleinen Wirkungen beständig summieren, so daß sie wenigstens dem Ohr mit seiner wunderbaren Feinempfindung sehr leicht erkennbar werden. Wir wollen dies durch ein bekanntes Beispiel aus einem anderen Gebiet erläutern.

Unsere Ingenieurkunst baut mächtige Hängebrücken über Ströme und Meeresarme. Diese Bauwerke müssen ihrer Konstruktion entsprechend gewaltige innere Spannungen haben, deren Größe wir nach früher entwickelten Gesetzen der Mechanik berechnen können. Diese Spannungen und die notwendige Elastizität des verwendeten Materials geben ihnen durchaus die Eigenschaften schwingender Saiten, sie besitzen Eigenschwingungen von ganz bestimmter Größe, die, durch einen Stoß angeregt, lange Zeit weiter die Brücke auf und nieder bewegen, ohne daß andere Stöße hinzutreten. Diese Brücken sind so fest gebaut, daß man sie dicht mit Menschen besetzen könnte, ohne daß sie dadurch Schaden nehmen würden. Dagegen würde unter Umständen eine kleine Anzahl von Menschen, etwa ein Trupp Soldaten, solch einem Riesenbau verhängnisvoll werden, wenn dieselben im Schritt über die Brücke marschieren, weil es sich ereignen kann, daß die Eigenschwingungen der Brücke eine Schwingungszahl erreichen, die in einem einfachen Verhältnis zu dem Rhythmus des Marschtrittes steht. Schwingt z. B. die Brücke in gleichem Tempo, so bewegt sich dieselbe jedesmal in demselben Augenblicke vermöge der früher erhaltenen Impulse nach unten, in welchem durch einen folgenden Schritt der Marschierenden ein neuer Impuls im selben Sinne hinzutritt und den Ausschlag der schwingenden Brücke vergrößert. Die Kraft, die durch das gleichmäßige Schreiten weniger Menschen auf die Brücke ausgeübt wird, kann sich also verhundertfältigen, wenn hundert Schritte im gleichen Tempo erfolgen, und schließlich kann die Brücke unter diesen wenigen Menschen zusammenbrechen, obgleich sie hundertmal mehr Last unter gewöhnlichen Umständen zu tragen vermag.

Die gleiche Wahrnehmung macht man an schwingenden Saiten. Die von ihnen ausgehenden Luftwellen sind die im Schritt marschierenden Soldaten. Treffen sie auf Saiten von gleicher Schwingungszahl, so summieren sich ihre Wirkungen und setzen ihrerseits die Saite nach und nach in merkliche Schwingungen. Man kann sich davon überzeugen, wenn man eine Saite auf einer Geige anstreicht, während sich eine andere gleichgestimmte Geige in der Nähe befindet. Diese zweite, nicht berührte Geige wird dann denselben Ton, der auf der ersten erzeugt wurde, weiter ertönen lassen, wenn die erzeugenden Schwingungen der ersten Saite längst aufgehört haben. Man nennt dieses Mitschwingen, beziehungsweise Nachschwingen die Resonanz. Ohne weiteres ist einzusehen, daß auch die Obertöne zu einem angeschlagenen Grundton durch die Resonanz zur Erscheinung kommen müssen. Macht eine Saite noch einmal soviel Schwingungen als eine andere, so wird jede zweite ihrer Schwingungen durch die andere verstärkt werden. Durch den Grundton wird also auch die höhere Oktave erregt. Man kann sich auf einem Klavier leicht davon überzeugen. Zieht man das Pedal, so daß alle Saiten frei schwingen können, schlägt dann mehrmals wiederholt einen Ton stark an, dämpft ihn dann aber sofort wieder etwa mit dem Finger, ohne die anderen Saiten zu berühren, so hört man ganz deutlich die nächst höhere Oktave des Tones. Daß die betreffende Saite wirklich in Schwingung gerät, kann man durch kleine sogenannte Papierreiterchen ersichtlich machen, die man auf die Saiten setzt. Sie werden sonst alle in Ruhe bleiben, nur das von der zugehörigen Oktavsaite wird abgeworfen, wenn man den Grundton anschlägt.

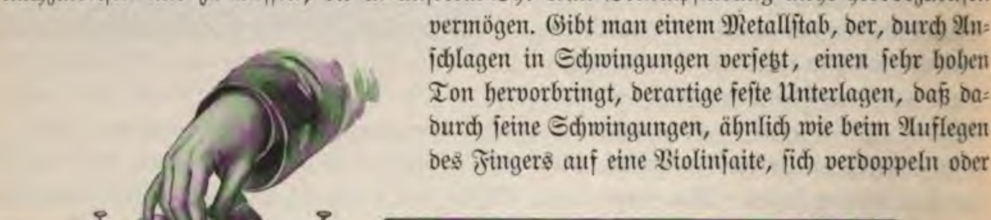
Ändert man das Experiment so ab, daß man durch Auflegen des Fingers auf die betreffende Taste nur der höheren Oktave eines Grundtons die Möglichkeit des Mitschwingens gibt, so wird für ein feines Gehör der durch die Resonanz nun erzeugte Ton etwas andere Klangfarbe haben, als wenn, wie beim ersten Experiment, allen Saiten das Mitschwingen möglich gemacht wird. Dies liefert den Beweis dafür, daß durch die Resonanz auch noch andere Obertöne als die Oktave ausgelöst werden, wie es unsere mechanische Anschauung von dem Vorgange ja auch ohne weiteres verständlich macht. Indem man statt schwingender Saiten Körper anwendet, deren Flächen eine größere Menge Luft in Mitschwingung zu versetzen vermögen als eine dünne Saite, aber dabei doch nur eine ganz bestimmte Schwingungszahl haben, kann man die Wirkung eines bestimmten Tones für unser Ohr besonders verstärken, so daß man ihn aus einem Gemisch von vielen selbst wesentlich lauteren Tönen unterscheidet. Auf diese Weise hat Helmholtz seine berühmten Untersuchungen über die Obertöne in seiner „Lehre von den Tonempfindungen" ausgeführt.



Klangstäbe zur Erzeugung der höchsten hörbaren Töne.

Die sogenannten Resonanzböden verschiedener Musikinstrumente haben dagegen die Eigenschaft, bei jeder Tonwirkung mitzuschwingen. Sie verstärken deshalb jeden Ton wegen ihrer größeren Fläche, die ihrerseits die Luft zum Mitschwingen zwingt.

Die Wirkung der Resonanz ist auch dabei behilflich gewesen, jene schnellsten Schwingungen nachzuweisen und zu messen, die in unserem Ohr keine Tonempfindung mehr hervorzurufen vermögen. Gibt man einem Metallstab, der, durch Anschlagen in Schwingungen versetzt, einen sehr hohen Ton hervorbringt, derartige feste Unterlagen, daß dadurch seine Schwingungen, ähnlich wie beim Auflegen des Fingers auf eine Violinsaite, sich verdoppeln oder verdreifachen müssen, dann kann man es erreichen, daß die Schwingungszahl solches Klangstabes weit über die Grenze der Hörbarkeit hinausgeht (s. die obenstehende Abbildung). Wir hören dann beim Anschlagen nur den kurzen Schlag selbst, kein Klingen. Es wäre möglich, daß unter diesen Umständen der Stab wirklich keine Schwingungen mehr ausführt. Ohne weiteres würden dieselben eine viel zu geringe Energie besitzen, um sie etwa sichtbar zu machen. Man hilft sich damit, daß man einen solchen Stab in eine Glasröhre hineinragen läßt und der



Kundtsche Staubfiguren. Vgl. Text, S. 143.

in ihr enthaltenen Luftsäule durch Verschiebung eines am anderen Ende eingefügten Stöpsels eine bestimmte Länge gibt. Durch das Mitschwingen der Luftsäule in der Röhre wird die mechanische Wirkung jener Schwingungen wesentlich verstärkt. Trotzdem hört man keinen Ton. Wenn man indes leichte Staubteilchen, etwa aus Kork, gleichmäßig in der Röhre verteilt, so werden diese von den Gegenden stärkster Wellenbewegung, die wir als Wellenbäuche bezeichnet haben, fortgestoßen und bleiben nur in den Knotenpunkten liegen. Es entstehen so eigentümliche Figuren, die man nach dem ersten Darsteller derselben **Kundtsche Staubfiguren** genannt hat (s. die untere Abbildung, S. 142). Die Ausmessung der Entfernung jener Knotenpunkte voneinander ergibt die Wellenlänge der Schwingungen und damit zugleich auch ihre Geschwindigkeit.

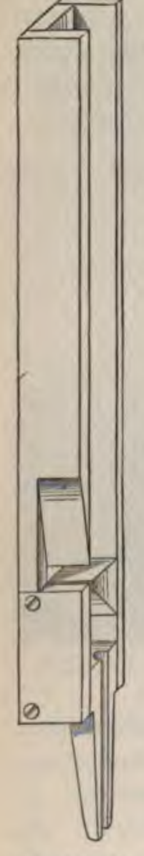
Hier anschließend, mögen auch die sogenannten **Chladnischen Klangfiguren** erwähnt werden, die sich in ähnlicher Weise durch die Verteilung von Sand auf schwingenden Metallplatten bilden. Die **Knotenpunkte** von Körpern, die sich wie die Saiten im wesentlichen nur nach zwei Dimensionen ausdehnen, werden auf schwingenden Flächen zu **Knotenlinien**, deren Form um so verwickelter ist, je mehr Obertöne sich mit dem Grundton der Platte vermischen. Sieht man diese vielverzweigten, symmetrisch höchst reizvollen Linienverbindungen (s. die nebenstehende Abbildung) und bedenkt, daß, während diese auf der tönenden Platte entstanden, die Luftteilchen rings um uns herum dieselben Gruppierungen in körperlicher, also noch viel verwickelterer Form bilden mußten, so mag man eine schwache Anschauung davon erhalten, wie unendlich verschlungen die Welt der Moleküle und Atome mit ihren gesetzmäßigen Gruppierungen und Bewegungen ist, von denen unsere Sinne direkt nichts wahrnehmen.



Chladnis Klangfiguren.

Bei der Bildung der Kundtschen Staubfiguren bedienten wir uns einer Glasröhre, die mit ihrem darin beweglichen Stöpsel durchaus die Form einer sogenannten **Pfeife** hat. Ein an der offenen Seite einer solchen Röhre vorbeifließender gleichmäßiger Luftstrom, wie er bei Anwendung solcher Pfeifen durch unseren Mund ausgestoßen wird, entsteht einen Ton, dessen Höhe von der Länge der Pfeife abhängig ist, den wir also durch Bewegung des Stöpsels in der Röhre verändern können. Die Entstehung dieses Tones bedarf noch der Erklärung, da der gleichmäßig vorbeigeführte Luftstrom keine Schallwellen enthält. Diese entstehen erst dadurch, daß ein Teil der strömenden Luft in die Röhre gedrückt wird und hier eine Verdichtung entsteht, die vom geschlossenen Ende der Pfeife zurückprallt und dann erst wieder beim offenen Ende austritt. Hier übt die Verdichtung einen Stoß auf den vorüberziehenden Luftstrom aus, der sich in Intervallen wiederholen muß, welche, offenbar durch die Länge der Pfeife bedingt, den Ton hervorbringen. Es ist leicht, die Tonhöhe einer solchen Pfeife vorher zu bestimmen. Stellen wir uns den Vorgang noch etwas genauer vor. Nachdem die erste Luftverdichtung die Länge der Pfeife, die wir mit l bezeichnen wollen, zweimal, einmal auf und ab, durchlaufen hat, stößt sie, wieder austretend,

den gleichmäßig vorüberziehenden Luftstrom, mit der die Pfeife angeblasen wird, zurück und erzeugt deshalb an der Öffnung eine Luftverdünnung, die ihrerseits wieder die Pfeifenlänge zweimal durchläuft. Erst eine Verdichtung und eine Verdünnung zusammen, ein Wellenbauch und ein Wellental, bilden eine vollständige Schallwelle, die bei einer geschlossenen oder sogenannten gedeckten Pfeife die Länge $4l$ zeigt und die Pfeife mit der Geschwindigkeit des Schalles v durchläuft. Wir erhalten also ihre Schwingungszahl $n = \frac{v}{4l}$, oder, da v = 333 m ist, $\frac{83{,}25}{l}$ m. Soll eine gedeckte Pfeife den Pariser Kammerton von 435 Schwingungen angeben, so muß sie $\frac{83{,}25}{435} = 0{,}192$ m lang sein. 16mal länger ist eine Orgelpfeife, die das vier Oktaven tiefer liegende Subkontra-A hervorbringt, also 3,07 m.


Orgelpfeife.

Unsere Röhre bringt aber auch einen Ton hervor, wenn sie unten nicht geschlossen ist. Dann tritt die Luftverdichtung schon unten aus und erweckt hier dasselbe Spiel zwischen Verdichtung und Verdünnung, wie es bei der gedeckten Pfeife erst oben stattfindet. Wir sehen deshalb, daß die Wellenlänge einer offenen Pfeife nur halb so lang sein kann, als die einer gedeckten, somit ihre nächst höhere Oktave gibt. Für ihre Schwingungszahl erhalten wir die Formel $n = \frac{v}{2l}$, oder $\frac{166{,}5}{l}$. Eine offene Pfeife muß, um denselben Ton hervorzubringen wie eine gedeckte, noch einmal so lang sein. Beide Pfeifenarten unterscheiden sich außerdem noch durch verschiedene Verbindungen von Obertönen, sie haben verschiedene Klangfarben und werden entsprechend in der Musik auch verwendet.

Die in Verwendung befindlichen Konstruktionen von Pfeifen können uns hier nicht näher interessieren. Sie beruhen alle auf demselben Prinzip, durch sich begegnende Luftströme Schwingungen zu erzeugen. Eine Orgelpfeife ist hierneben abgebildet.

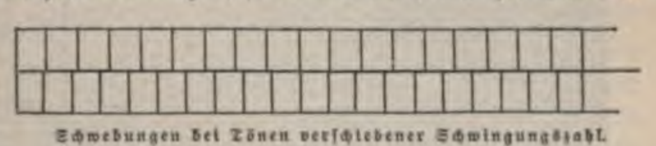
Bei näherem Hinblick wird man leicht erkennen, daß die Pfeifen auf ganz verschiedene Weise Tonschwingungen erregen wie die Saiten. Letztere schwingen senkrecht zu ihrer Längsausdehnung, transversal, und das System der erzeugten Luftwellen breitet sich parallel zu den Saiten aus. Bei den Pfeifen hingegen bewegen sich die Wellen in der Längsrichtung hin und her, longitudinal. Wir können solche Longitudinalschwingungen auch bei Saiten hervorbringen, indem wir sie in geeigneter Weise in ihrer Längsrichtung streichen. Es werden dann in dem metallischen Medium der Saite Verdichtungen herbeigeführt, die sich mit einer Geschwindigkeit, welche der Elastizität des Metalles entspricht, längs der Saite fortpflanzen. Dadurch entsteht ein schriller Ton, der mit dem von den Transversalschwingungen der Saite erzeugten in keinerlei Beziehung steht. Also nicht nur in dem Medium der Luft, sondern auch in jedem anderen elastischen Körper werden Schwingungen fortgepflanzt, die Töne erwecken können, wie das von vornherein zu erwarten war. Wir kommen noch darauf zurück.

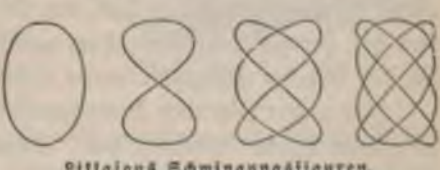
Die Erscheinungen der Schallschwingungen interessieren uns auch deshalb besonders, weil sie als die langsamsten in der scheinbar endlosen Stufenleiter von Schwingungen in der Natur unserem menschlichen Fassungsvermögen am zugänglichsten sind. Wir können in Bezug auf die Schwingungen höherer Ordnung, mit denen wir uns später zu beschäftigen haben werden, hier Parallelstellen finden, die uns das Verständnis jener wesentlich erleichtern. Dies ist namentlich bei den Erscheinungen der sogenannten Interferenz der Fall. Schon bei Gelegenheit der Wasserwellen (S. 97) haben wir den Begriff der Interferenz entwickelt. Sie

bringt die ganz natürliche Erscheinung hervor, daß zwei sonst ganz gleiche Wellenzüge, die einander in Zwischenräumen von genau einer halben Wellenlänge begegnen, sich vollkommen aufheben müssen. Die betreffenden Materieteilchen, die von jedem Wellenzug einzeln auf und ab geführt werden würden, erhalten dann von den beiden Wellenzügen überall gleiche, aber entgegengesetzte Impulse und bleiben deshalb überhaupt ruhend. Die Interferenz der Schallwellen muß bei entsprechender Anordnung des Experimentes die eigentümliche Erscheinung bringen, daß ein Ton, zu einem zweiten hinzutretend, diesen nicht verstärkt, sondern aufhebt. Das Experiment ist von **Nörremberg** in der Weise gemacht worden, daß man, wie nebenstehend angedeutet, ein und demselben Ton in einer verzweigten Röhre zwei Wege gab, wovon der eine um eine halbe Wellenlänge des Tones länger ist als der andere. Dann vereinigt sich da, wo beide Wege wieder zusammentreffen, immer ein Wellental von der einen Seite mit einem Wellenberge von der anderen. Es ist in der Tat an der gemeinsamen Austrittsöffnung kein Ton zu hören, während er sofort wieder auftritt, wenn man die eine oder die andere Verzweigung der Röhre schließt. Wir haben damit eine sehr wichtige Eigenschaft der Wellenbewegung auch beim Schall als vorhanden nachgewiesen.


Nörrembergs Interferenzapparat.

Eine hiermit verwandte Erscheinung ist die der **Schwebungen**. Wenn zwei nahezu, aber doch nicht völlig gleiche Töne zusammenklingen, so bemerkt man, daß ihre Stärke in bestimmten Intervallen an- und abschwillt, der gemeinsame Ton, der durch die geringe Differenz beider Tonquellen noch nicht zum Mißton geworden ist, zeigt **Schwebungen** oder **Stöße**. Sie entstehen dadurch, daß in bestimmten Abschnitten die Wellenberge des einen Wellenzuges mit denen des anderen zusammentreffen und dadurch den Ton verstärken, während in der Mitte zwischen zwei solchen Verstärkungen ein Wellenberg der einen Tonquelle mit einem Wellental der anderen sich vereint, um sich interferierend aufzuheben. Ein Abmessen auf einer Aufzeichnung von zwei Wellenzügen dieser Art, wie sie die mittlere Abbildung gibt, oder eine einfache mathematische Betrachtung zeigt, daß der Abstand von zwei Punkten, in denen die Wellenberge beider Züge zusammentreffen, gleich der Geschwindigkeit des Schalles 333 m ist, dividiert durch die Differenz der beiden Wellenlängen, und daß folglich in einer Sekunde so viel Schwebungen auftreten, als diese Differenz beträgt. So werden zwei **Stimmgabeln**, von denen die eine den deutschen Kammerton von 440, die andere den Pariser mit 435 Schwingungen angibt, fünf Schwebungen in der Sekunde hervorbringen, wenn ihre Töne zusammenklingen.


Schwebungen bei Tönen verschiedener Schwingungszahl.


Lissajous Schwingungsfiguren.
Vgl. Text, S. 146.

Durch eine sinnreiche Vorrichtung kann man die Schwingungen von Stimmgabeln sich selbst graphisch aufzeichnen lassen. Man befestigt zu dem Zweck oben an der Stimmgabel einen kleinen Spiegel, auf dem man einen leuchtenden Punkt reflektieren läßt. Der vom Spiegel zurückgeworfene Strahl macht dann alle Bewegungen der Stimmgabel mit. Der strahlende

Punkt wird dadurch zu einer Linie ausgezogen, die um so länger ist, je weiter entfernt die Fläche gehalten wird, auf der man den Strahl auffängt. Hier kann man ihn auf photographisch empfindliches Papier fallen lassen, worauf sich die Lichtlinie dauernd aufzeichnet. Nun läßt man den Strahl zuvor einen zweiten, mit einer zweiten Stimmgabel verbundenen Spiegel treffen. Dann verbinden sich die Schwingungsbewegungen beider Stimmgabeln zu einer Figur, die im einfachsten Fall ein Kreis ist, während sie bei seitlicher Bewegung des aufzeichnenden Papierstreifens sich als Wellenlinien darstellen, die wir auf S. 145 unten wiedergegeben haben. Man nennt solche Figuren nach dem Erfinder des betreffenden Apparates Lissajousche Figuren.



Messung der Schallgeschwindigkeit unter Wasser. Vgl. Text, S. 148.

Sobald die Differenz der Schwingungen zweier gleichzeitig auftretender Töne größer wird als zwölf, kann, wie wir wissen, unser Gehirnapparat die entstehenden Schwebungen oder Stöße als Einzelwirkungen nicht mehr auffassen (s. S. 133), dagegen vereinigen sich diese wieder zu einem besonderen Ton, dem Differenzton. Wie also ein einzelner Ton seine Obertöne hat, bringen kombinierte Töne gewissermaßen Untertöne hervor. Immer reicher gestaltet sich das Bild der vielverschlungenen Schwingungen, mit denen uns die Musik entzückt.

Für unsere folgenden Betrachtungen wertvoll ist noch eine andere Schallerscheinung, die jedermann bereits beobachtet hat. Wenn zwei Eisenbahnzüge sich begegnen, von denen der eine die Pfeife ertönen läßt, während wir uns in dem anderen befinden, so bemerken wir, daß der Ton der Pfeife plötzlich tiefer wird, sobald die Lokomotive an uns vorüberfährt. Vor und nachher verändert er sich dagegen nicht weiter. Hätten wir die beiden Töne festgelegt, so würden wir finden, daß keiner von ihnen dem wirklichen Tone der ruhenden Lokomotivpfeife entspricht, sondern daß dieser mitten zwischen beiden liegt. Wir sehen also, daß die Bewegung der Tonquelle den Ton verändert; er wird höher bei Annäherung, tiefer bei Entfernung. Unsere





Lichtes macht. Durch dieses sogenannte Dopplersche Prinzip werden uns Aufschlüsse über die Bewegungen von Himmelskörpern gegeben, die sich in ganz unausmeßbaren Entfernungen von uns befinden, und die in gerader Linie auf uns zu oder von uns hinweg eilen.



Vergrößerter senkrechter Durchschnitt durch die Schnecke des Ohres mit den Gehörnerven. Vgl. Text, S. 149.

Da uns die Luft überall umgibt, ist es begreiflich, daß wir die Schallerscheinungen hauptsächlich nur in ihr studieren. Aber es wird uns ebenso erklärlich sein, daß sich alle diese in der Luft beobachteten Erscheinungen auch in jedem anderen elastischen Medium zeigen, weil alle solche Medien Schwingungen fortpflanzen müssen. Wir verwundern uns nicht, daß eine Glocke unter dem Rezipienten der Luftpumpe aufhört zu läuten, wenn keine Luft sie mehr umgibt, anderseits aber auch nicht darüber, daß diese Glocke unter dem Wasser ihren Ton so gut verbreitet wie in der Luft. Freilich ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eine andere, entsprechend dem veränderten Elastizitätsgrade des Mittels. Für Wasser ergibt die Theorie eine Geschwindigkeit von 1410 m in der Sekunde, also reichlich viermal größer als für die Luft (s. die Abbildung, S. 146). Versuche, die man im Genfersee anstellte, indem man eine im Wasser versenkte Glocke anschlug und in entsprechender Entfernung durch ein gleichfalls unter das Wasser getauchtes Schallrohr den Ton auffing, haben eine Geschwindigkeit von 1435 m ergeben, eine Übereinstimmung, die innerhalb der Unsicherheit der Rechnungsgrundlagen für den theoretischen Wert und anderseits der Unsicherheit der Beobachtung selbst liegt. In festen Körpern ist, je nach ihrer Elastizität, die Geschwindigkeit der Fortpflanzung des Schalles eine noch beträchtlich größere. So findet man für Eisen von mittlerer Dichte 4030 m und hat auch diesen Wert durch die Beobachtung bestätigt gefunden. Die bedeutende Höhe der Töne von Stäben oder Saiten, die man in longitudinale Schwingungen versetzt (s. S. 144), verrät gleichfalls die größere Geschwindigkeit der Fortpflanzung der Schallwellen in diesen Körpern und läßt ihre Größe selbst finden.



Vergrößerter Querschnitt einer Schneckenwindung des Ohres. a Gehörnerven. Vgl. Text, S. 149.

Nachdem wir die hauptsächlichsten Eigenschaften der Schallschwingungen kennen gelernt haben, wird es uns leichter werden, ihre Auffassung durch unser Gehörorgan zu verstehen. Die Luftwellen werden durch den äußeren Gehörgang wie durch einen Schalltrichter, der sie verdichtet und dadurch verstärkt, an das Trommelfell geführt. Wie kompliziert auch die Form der letzten, das Trommelfell berührenden Luftschicht infolge jener vielverschlungenen Wellenbewegungen sein mag, das Trommelfell wird sie nachbilden. Es ist, wie der Resonanzboden eines Musikinstrumentes, fähig, alle Arten von Schwingungen nachzuahmen und fortzupflanzen. Der in der Mitte des Trommelfelles befestigte Hammer mit dem Steigbügel wirkt wie ein ungemein feiner Fühlhebel, der die Schwingungen abermals verstärkt auf die wässerige Flüssigkeit des inneren Ohrlabyrinthes überträgt, die den Schall besser leitet als Luft. Dieses Labyrinth steht mit der sogenannten

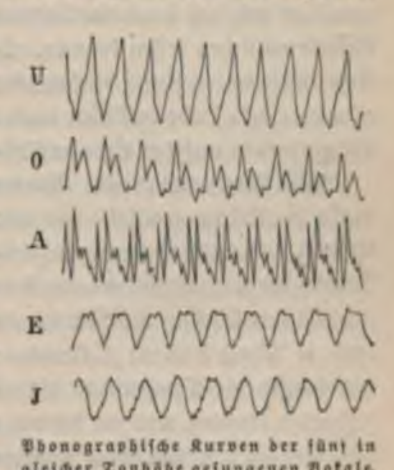


Wir dürfen dieses Kapitel nicht schließen, ohne von den physikalischen Wirkungen eines anderen Organes geredet zu haben, das nicht, wie das Ohr, die Schallschwingungen zum Bewußtsein bringt, sondern sie hervorruft; das ist der **Kehlkopf** und die mit ihm zusammenhängenden stimmbildenden Organe.

Das organische Instrument, welches die Schallschwingungen der Stimme erzeugt, ist im wesentlichen mit einer Orgelpfeife zu vergleichen, was seine physikalischen Wirkungen anbetrifft. In einer solchen (vgl. die Abbildung, S. 144) werden die Schallwellen durch das Erzittern einer **Zunge** gebildet, die durch das Anblasen mit einem gleichmäßig eingeführten Luftstrom mit einer Geschwindigkeit schwingt, die durch ihre Länge und ihre Elastizität bedingt ist. Im Kehlkopf übernehmen die **Stimmbänder** (s. die Abbildungen, S. 149) diese Aufgabe. Indem der von der Lunge ausgestoßene Luftstrom zwischen ihnen hindurchstreicht, versetzt er sie in die tonerzeugenden Schwingungen. Während aber die Zunge der Orgelpfeife unveränderlich ist und deshalb nur einen bestimmten Ton hervorrufen kann, sind die Stimmbänder durch die besonderen organischen Vorrichtungen des Kehlkopfes, mit deren näheren Beschreibung wir uns hier nicht aufhalten können, in sehr verschiedenem Grade dehnbar: sie können länger und kürzer gemacht werden, und man kann den Raum zwischen ihnen, die **Stimmritze**, erweitern und verengern, so daß wir auf diesem einen Instrument innerhalb eines Umfanges von mehr als zwei Oktaven nach einiger Übung an 150 verschiedene Tonstufen nach unserem Belieben mit großer Genauigkeit hervorbringen. So vielen verschiedenen Einzelinstrumenten entspricht also diese eine organische Orgelpfeife. Der Kehlkopf ist in dieser Hinsicht mit einer Violine zu vergleichen, die nur eine Saite hat und auf der doch der Künstler vortreffliche musikalische Wirkungen hervorzubringen vermag. Grundlegende Untersuchungen über die Physiologie der Gehör- und Stimmorgane verdanken wir **Helmholtz**, dessen Bild wir obenstehend bringen.


H. von Helmholtz. Nach Werckmeister, „Das 19. Jahrhundert in Bildnissen“.

Die menschliche Stimme besteht aber nicht nur aus reinen Tönen, sie hat auch sehr wechselnde Klangfarben. Diese werden durch Resonanzwirkung der verschiedenen Hohlräume hervorgebracht, die mit dem Kehlkopf zusammenhängen. So ist das ganze Knochengerüst des Brustkastens ein sehr wirksamer Resonanzboden, der den Brustton erzeugt. Bei der Fistelstimme dagegen schwingt nur die Mund- und Nasenhöhle mit. Während die letztere und die Brusthöhle im wesentlichen ihrer Form nach unveränderlich sind und deshalb nur eine bestimmte Klangfarbe haben, kann man dem Munde mit seinen Organen sehr verschiedene Formen geben, wodurch dem vom Kehlkopf gegebenen Grundton wechselnde Obertöne beigemischt werden. Dadurch entstehen die Vokale. Obgleich man nahezu jeden im Bereiche der betreffenden Stimmlage befindlichen Ton auf jeden der fünf Vokale singen kann, erhöht sich doch deutlich der Eindruck der Klangfarbe stufenweise in der Reihenfolge U O A E J. Phonophotographische Aufzeichnungen, die von H. Hermann und F. Auerbach ausgeführt worden sind, zeigen, daß die Obertöne bei U ausschließlich in der ersten und zweiten Oktave des Grundtons liegen, für O und A überhaupt nur in der zweiten, für E in der zweiten und dritten und endlich für J nur in der vierten Oktave. Die Mundhöhle hat also in den verschiedenen Formen, die zur Aussprache der Vokale angewandt werden, die Wirkung jener Resonatoren, die nur durch einen ganz bestimmten Ton in Mitschwingungen geraten und unter allen einen Grundton begleitenden Obertönen nur diesen verstärken. Nebenstehend sind die Kurven wiedergegeben, welche die fünf bei gleicher Tonhöhe gesungenen Vokale phonographisch darstellen. Am einfachsten zeigt sich der Wellenzug für U, bei dem man in den aufsteigenden Linien deutlich die Einbiegung in der Mitte sieht, wodurch sich der Oberton in der ersten Oktave, d. h. der halben Wellenlänge, ausprägt. Bei den niedersteigenden Linien erkennt man eine Einknickung auf dem vierten Teil ihrer Länge, dem Oberton der zweiten Oktave entsprechend. Alle diese Kurven sind selbst bei flüchtiger Betrachtung so wesentlich voneinander verschieden, daß man sie ohne weiteres als Schriftzeichen für die betreffenden Buchstaben verwenden könnte, wie man denn allen Ernstes daran gedacht hat, durch Vermittelung dieser beim Sprechen sich selbst aufzeichnenden Wellenzüge einen Typenapparat in Bewegung zu setzen, bei welchem ein bestimmter Wellenzug immer nur auf eine bestimmte Type wirkt und dadurch eine Rede sich selbsttätig in den gewöhnlichen Buchstaben abdruckt. Theoretisch ist ein solcher Apparat durchaus denkbar, wenngleich die Feinheit der Unterschiede in den Wellenzügen, namentlich für die Geräusche, welche die Konsonanten hervorbringen, eine so feinfühlige Konstruktion voraussetzt, wie sie praktisch heute noch nicht ausführbar ist.



Phonographische Kurven der fünf in gleicher Tonhöhe gesungenen Vokale.

7. Die Wärme.

Während die Erscheinungen des Schalles im Getriebe der großen Natur eine verhältnismäßig untergeordnete Rolle spielen, haben wir es in der Wärme mit der Äußerung der ureigentlichsten aller Naturkräfte zu tun, die in dem ganzen Weltgebäude allgegenwärtig ist, die im

Verein mit der Schwerkraft die Welt geschaffen hat und seitdem den bei weitem größten Anteil an ihrer Weiterentwickelung bis in die verborgensten Einzelheiten nimmt. Ein ungeheuerer Wärmestrom geht von dem Zentralherde unseres engeren Weltreiches, der Sonne, aus, und der 2735millionste Teil der von ihr ausstrahlenden Wärmewirkung, der die kleine Erde trifft, genügt, um die gewaltige Maschine unserer Atmosphäre in dauernder Bewegung zu erhalten, welche den Inhalt ganzer Meere zwischen den Wolken und der Erdoberfläche beständig auf und nieder kreisen läßt. Aber unsere Sonne ist im System der Milchstraße nur ein winziges Lichtpünktchen, ihre für uns unvorstellbar große Strahlungskraft verschwindet gegenüber der Arbeitsleistung jenes Gewimmels von Sonnen, die für unser schwaches Auge in der firmamentumspannenden Lichtbrücke zusammenschmelzen. Viele dieser Sonnen werden zweifellos von Planeten umkreist, die unserer Erde ähnlich sind. Überall dort weckt und unterhält die Wärme ein vielgestaltiges Leben, sobald ihre Kraft sich in den kleinsten Teilen der Materie soweit gemäßigt hat, daß dauernde Verbindungen unter ihnen das kunstvolle Gewebe der organischen Gebilde entstehen lassen konnten. Die Wärme ist die Allerhalterin des Lebens. Wie der Grad ihrer Wirkung den Augenblick angibt, in dem es entstehen kann, so legt sie auch die Grenze fest, wo es wieder dem Tode verfallen muß. Eine geringe Verschiebung in der Verteilung der jährlichen Wärmezufuhr auf der Erdoberfläche kann über ganze Völker Not und Verzweiflung bringen.

Die Allgegenwart der Wärme in ihren verschiedenen Graden und Erscheinungsweisen macht die Wirkungen fast aller anderen Kräfte der Natur von ihr abhängig. Diese können deshalb nur unter dem Einflusse der Wärme betrachtet werden; und wenn man im ewigen Wechsel der Naturerscheinungen ihre unveränderlichen Gesetze erkennen will, so ist es unerläßlich, zunächst den Einfluß der Wärme auf den Verlauf dieser Erscheinungen festzustellen, um diesen dann in Abzug bringen zu können. Schon in unseren vorangegangenen Betrachtungen haben wir häufig die Temperatur als einen notwendigen Faktor einführen müssen, noch ehe wir definieren konnten, was wir denn eigentlich unter Temperatur verstehen. So sahen wir namentlich, daß die Übergänge der Aggregatzustände ineinander von der Temperatur abhängig sind, daß die Schallgeschwindigkeit theoretisch nur unter Berücksichtigung gewisser Erfahrungen aus der Wärmetheorie mit der Beobachtung in Einklang gebracht werden kann und überhaupt mit der Lufttemperatur sich verändert.

Wegen dieser in allen anderen Gebieten der Naturkräfte immer wieder auftretenden Wirkungen der unerschöpflichen Kraftquelle der Wärme und auch wegen ihrer Fähigkeit, sich proteusartig in die Formen aller anderen Naturkraftwirkungen zu verwandeln, ist es schwer, der Wärme ihren richtigen Platz in einer Darstellung der gesamten Naturkräfte anzuweisen. Öfters ist sie als letzte der Naturkräfte behandelt worden, weil zum vollen Verständnis ihrer vielfachen Wechselwirkungen auch die Wirkungen der anderen Kräfte bekannt sein müssen. Aber diesen Übelstand teilen eigentlich alle diese Gruppierungen, denn die Naturkräfte greifen eben überall ineinander, und mehr als je wird man bei der Behandlung der Wärmeerscheinungen daran erinnert, daß die Zerlegung des Gesamtbildes der bewegten und sich rastlos weiter entwickelnden Natur in die Einzelwirkungen der sogenannten Naturkräfte etwas durchaus Willkürliches oder doch nur von der Eigenart unserer Sinneswerkzeuge Bedingtes ist. Deshalb bleibt auch die Anordnung des Stoffes willkürlich, und das Verständnis der erstbehandelten Gegenstände muß immer unter der Unvollkommenheit des Überblickes der mit ihnen unzertrennlich verbundenen später behandelten Gegenstände leiden. Dies ist auch bei der folgenden Darstellung der Wärmeerscheinungen um so weniger zu vermeiden gewesen, als wir sie nahezu an den Anfang der

Angesichts der allgemeinen Gepflogenheit, Wärmemengen durch Thermometergrade zu messen, müssen wir uns indes gleich von vornherein darüber klar werden, daß die Anwendung dieser Methode allein uns in einen logischen Kreisschluß verwickeln müßte. Wir setzen dabei voraus, was wir ja erst beweisen wollen, daß nämlich gleiche Wärmemengen auch gleiche meßbare Kraftwirkungen hervorbringen. Bringen zwar gleiche Ursachen immer gleiche Wirkungen hervor, so brauchen doch die letzteren nicht immer für uns in ihrem vollen Umfang in die Erscheinung zu treten. Das Volumen der festen und flüssigen Körper vergrößert sich, wie wir sehen werden, durchaus nicht immer in einem einfachen Verhältnis zu der eingeführten Wärmemenge. Wenn solche Ungleichheiten auch bei dem Quecksilber auftreten, so messen wir mit gleichen Skalenteilen des Quecksilberthermometers durchaus nicht auch gleiche Wärmemengen. Unsere Untersuchung würde von vornherein falsche Daten ergeben, und wir würden damit alle unsere weiteren Schlüsse falsch verketten. Wir kommen auch hier nur durch Näherungsmethoden allmählich zur Wahrheit. Ganz besonders die Wärme bietet wegen ihrer Verwandelbarkeit die verschiedenartigsten Wege für solche Näherungsmethoden. Man kann eine bestimmte, durch eine Thermometerskala gemessene Wärmemenge in Gravitationsarbeit verwandeln, indem sie etwa mit Hilfe einer Dampfmaschine gezwungen wird, ein Gewicht zu heben, und die Vergleichung verschiedener solcher Gewichtsmengen mit den zugehörigen Thermometerangaben ist deshalb zur gegenseitigen Kontrolle dienlich. Ferner zeigt es sich, daß die Wärme einen Einfluß auf die elektrischen Erscheinungen hat, so daß man auch diese Wirkungen miteinander vergleichen kann, und so fort. Alle diese Erfahrungen haben gezeigt, daß die Ausdehnung des Quecksilbers innerhalb gewisser Grenzen, die in den meisten Fällen infolge der äußeren Verhältnisse, unter denen man ein solches Meßinstrument gebraucht, nicht überschritten werden können, mit einer Wärmewirkung gleichmäßig fortschreitet, die auch bei allen anderen Prozessen eine gleichmäßig sich steigernde Wirkung hervorbringt. Wir können also wirklich das Quecksilberthermometer als einen Wärmemesser ansehen, der mit gleichen Skalenteilen gleiche wirksame Wärmemengen mißt.



Die drei Thermometersysteme Fahrenheit, Celsius und Reaumur. Vgl. Text, S. 155.

Da das Thermometer unser fundamentaler Wärmemaßstab werden soll, müssen wir dafür sorgen, daß seine Angaben überall und zu allen Zeiten miteinander vergleichbar sind, also eine feststehende Übereinkunft treffen, wie groß wir seine Teilstriche machen, und von welchem Punkt an wir sie zählen wollen. Ohne weiteres könnten wir das Metermaß dazu als Grundlage nehmen, einen Grad etwa 1 mm groß machen. Dann müßten aber zwei Thermometer, die gleiche Angaben machen sollen, auch ganz genau gleichstarke Röhren haben und überhaupt genau übereinstimmend gebaut sein. Um die großen, dabei einlaufenden Fehlerquellen zu vermeiden, hat man das sonst mit so großem Vorteil allgemein eingeführte Metermaß in der Thermometrie nicht verwendet, sondern ein solches, das durch die Wärmewirkungen selbst geschaffen wird und deshalb bei jedem Thermometer leicht einer Kontrolle durch seine Angaben selbst unterworfen werden kann. Von diesen Gesichtspunkten aus ist man übereingekommen,

den Anfangspunkt der Skala dort festzulegen, wo der Quecksilberfaden in seiner Röhre stehen bleibt, wenn man das Thermometer in ein Gemisch von Wasser und kleinen Eisstücken taucht, also mit anderen Worten: es sollen unsere Wärmezählungen immer bei der Temperatur des schmelzenden Eises beginnen, von der die Erfahrung gelehrt hat, daß sie unter sonst gleichen äußeren Verhältnissen stets bei einem gleichen Stande der Quecksilbersäule eintritt. Man nennt diesen Punkt den Gefrierpunkt. Das andere Ende unseres Temperaturmaßes wird dort markiert, wo der Quecksilberfaden stehen bleibt, wenn er in Wasser taucht, das unter normalem Atmosphärendruck zu kochen beginnt. Wir haben dadurch seinen Siedepunkt bestimmt.

Zwischen Gefrier- und Siedepunkt kann man nun beliebig viele Teilstriche einschalten. Für wissenschaftliche Untersuchungen bedient man sich ausschließlich nur noch einer Skala, die zwischen jenen beiden Punkten hundert Teile, sogenannte Celsius- oder Zentigrade, besitzt. Wir werden, wenn nicht ausdrücklich anderes angegeben wird, nur diese im folgenden benutzen. In Deutschland sind namentlich noch Thermometer nach Reaumur im Gebrauch, bei denen das oben definierte Intervall nur in 80 Grade geteilt ist. In England und Amerika endlich rechnet man nach Fahrenheitgraden. Bei dieser ganz veralteten Thermometerskala liegt der Gefrierpunkt beim Teilstrich 32, und von hier bis zum Siedepunkte sind 180 Teile gemacht, so daß der letztere bei 212 liegt. 0° F (Fahrenheit) ist gleich $-17\frac{7}{9}$° C (Celsius). Das Fahrenheit-Thermometer hat also den kleinen Vorteil, daß es in den meisten Fällen, in denen man es im bürgerlichen Leben gebraucht, keine negativen Grade anzeigt. Für den wissenschaftlichen Gebrauch aber hat es nur Nachteile, und es wäre deshalb durchaus erwünscht, daß das 100teilige Thermometer nach Celsius ausschließliche Verwendung fände (s. die Abbildung, S. 154).

Wie man im einzelnen ein Quecksilberthermometer zu konstruieren und bei seinen Angaben Fehlerquellen namentlich wegen der Ausdehnung der verschiedenen angewandten Glasarten zu berücksichtigen hat, kann hier nicht weiter dargestellt werden.

Luftthermometer.

Das Quecksilberthermometer reicht nicht zu allen Temperaturmessungen aus. Bei $-39\frac{1}{2}$° gefriert das Quecksilber und versagt deshalb seinen Dienst für die Messung tieferer Kältegrade, während die moderne Physik gelegentlich mit Temperaturen unter -200° arbeitet. Bei $+357$° aber geht das Quecksilber in Dampfform über und ist also auch nach obenhin nicht weiter zu benutzen. Deshalb und auch noch aus anderen Gründen für die größere Sicherheit der Messungen wendet man in der Physik die Ausdehnung von Gasen, am einfachsten also der atmosphärischen Luft, zur Temperaturbestimmung an. Die früher sogenannten permanenten Gase haben ja den Vorzug, erst bei ganz extrem tiefen Temperaturen in einen anderen Aggregatzustand überzugehen, und dehnen sich außerdem bei gleicher Wärmezufuhr viel mehr aus als tropfbare Flüssigkeiten oder feste Körper. Beim Luftthermometer (s. die obenstehende Abbildung) tritt also an die Stelle des Quecksilbers die Luft, welche in einem ganz ähnlichen Gefäße wie die Quecksilberthermometerröhre mit ihrer Kugel von der äußeren Luft durch irgend eine schwere Flüssigkeit, also etwa wieder Quecksilber, bei C abgeschlossen wird. Durch die Ausdehnung der Luft in dem Thermometergefäße AB wird der Quecksilberfaden in der Haarröhre D weiter hinausgetrieben, somit gibt er durch seine Bewegungen den Wechsel der Temperaturen an, denen die abgeschlossene Luft ausgesetzt wird. Da der Quecksilberfaden außen unter dem jeweiligen Atmosphärendrucke steht, so ist dieser bei

den Messungen mit dem Luftthermometer jedesmal zu berücksichtigen, während dies bei den übrigen Thermometern nur einmal bei der Festlegung des Siedepunktes, streng genommen auch des Gefrierpunktes, nötig ist.

b) Das Gasgesetz.

Bei der Messung der Einwirkungen der Wärme auf die verschiedenen Körper mit Hilfe der Thermometer und ähnlicher Instrumente beginnen wir wieder mit den Gasen, weil wir auch bei der Wärme, wie bei den anderen Erscheinungen, erwarten können, daß die zu erforschenden Beziehungen sich bei diesem am freiesten beweglichen Zustande der Materie am einfachsten und klarsten enthüllen werden.

In der Tat zeigt es sich, daß zwischen der Zunahme der Temperatur und der des Volumens eines Gases, d. h. seiner Ausdehnung, ein ganz überraschend einfaches Verhältnis besteht. Jedes beliebige Gas, welcher Zusammensetzung es auch sein mag, dehnt sich bei einer Temperaturerhöhung von 1° um den 0,00366. Teil seines Volumens oder im echten Bruch um $^1/_{273}$ aus. Man nennt eine solche Verhältniszahl den Ausdehnungskoeffizienten eines Stoffes. Dieser ist also, wie zuerst Gay-Lussac erkannte, für alle Gase und bei allen Temperaturen ein und dieselbe Konstante, gewisse Einschränkungen vorbehalten, auf die wir zurückkommen.

Dies besagt also, daß eine gewisse Menge Luft, Wasserstoff, Kohlensäure oder irgend eines anderen Gases, die bei 0° den Raum eines Kubikmeters einnahm, nach einer Erwärmung um 273° nun 2 cbm Raum für sich in Anspruch nimmt, selbstverständlich unter der Voraussetzung, daß man bei der Wärmezuführung ihrer Ausdehnung kein anderes Hindernis entgegenstellt als den Druck, welcher es zu Anfang auch schon zusammenhielt, also etwa den Druck von einer Atmosphäre. Fachmännisch sagen wir, daß die Zahl 0,00366 der Ausdehnungskoeffizient bei konstantem Drucke (c_p) ist.

Dehnt sich aber ein Gas bei einer Temperaturerhöhung von 273° von einem Kubikmeter auf zwei in gleichmäßig fortschreitender Weise aus, so müssen wir auch folgern, daß eine Abkühlung von 0° auf —273° eine Zusammenziehung des Gases von einem Kubikmeter, d. h. also auf das Volumen Null, bewirken muß, oder daß die Masse der Gase bei dieser Temperatur von —273° eine unendlich große Dichtigkeit erreicht. Ein weiteres Sinken der Temperatur könnte also keinen Einfluß mehr auf das Volumen der ursprünglichen Gasmaterie haben oder überhaupt keine Bewegung ihrer einzelnen Teile, Moleküle, hervorbringen, die vollkommen fest aneinandergepreßt sind, um das theoretisch notwendige Minimum an Volumen einzunehmen. Man hat deshalb diesen Temperaturgrad —273 den absoluten Nullpunkt und eine von diesem an gezählte Temperatur die absolute Temperatur genannt, die man mit dem Buchstaben T zu bezeichnen pflegt.

Erfahrungen an den nicht gasförmigen Körpern, auf die wir zurückkommen, machen es wahrscheinlich, daß dieselben ihre maximale Dichte meist schon weit über dem absoluten Nullpunkt erreichen müssen. Bei dieser Temperatur herrscht also völlige Regungslosigkeit, da bei absoluter Dichte keinerlei physikalische oder chemische Wirkungen mehr möglich sind. Würden Teile des Weltalls, die von jeder Außenwirkung ausgeschlossen sind, sich durch Wärmeabgabe an den jedenfalls sehr kalten Weltraum bis zu dieser Temperatur von —273° abgekühlt haben, so würden sie bis in alle Ewigkeiten in ihrem regungslosen, toten Zustande verharren müssen. Da nun alle sich selbst überlassenen Körper immer nur kälter, niemals aus sich selbst heraus wärmer werden können, wie wir später noch näher sehen werden, so müßte man also

auch annehmen, daß das ganze Universum, als ein einheitliches Ganzes betrachtet, immer nur kälter wird und deshalb jenem absoluten Nullpunkte der Temperatur entgegengeht, bei welchem für alles Geschaffene der ewige Tod eintritt, ein Untergang des Weltganzen, dem nie wieder eine Neuschöpfung folgen kann. Unsere Sonne hat gegenwärtig noch eine Temperatur, die jedenfalls nicht viel von 8000° verschieden ist, während sie in früheren Schöpfungszeiten wohl noch viel heißer gewesen sein muß. Die Erde, welche sich einst von der Masse des ganzen Systems losriß, hat auch die damalige Temperatur der Sonne besessen. Dagegen weist die Oberfläche der Erde heute nur noch eine Durchschnittstemperatur von wenigen Graden über Null an. Dies zeigt, wie nahe wir jenem absoluten Nullpunkte bereits sind, und daß wir von dem ungeheuren Kapital an Lebenswärme, das unserer Erde bei ihrer Geburt mitgegeben wurde, bereits viele Tausende der betreffenden Einheiten ausgegeben, aber nur noch etwa dreihundert derselben zu verzehren haben. Dann stehen wir vor dem absoluten Nichts, denn Materie ohne Regung ist auch ohne alle Wirkung, ohne Eigenschaft, ist nichts. Wir kommen auf diese große Frage zurück, wenn wir erst das Wesen der Wärme und der übrigen Naturkräfte tiefer erkannt haben.



Feste Luft.

Vor noch nicht langer Zeit war man der Meinung, man würde sich experimentell jenem geheimnisvollen Nullpunkt alles Geschehens niemals um ein Erhebliches nähern können. Man hatte deshalb vermutet, daß dieser errechnete Nullpunkt nur eine Abstraktion der Theorie sei, während sich die Körper in seiner Nähe doch wohl anders verhalten würden, wie innerhalb der experimentell bekannten Temperaturen. Mit anderen Worten, man glaubte, daß der Ausdehnungskoeffizient der Gase nicht unter extremen Verhältnissen so konstant sei, sondern sich von der Temperatur selbst abhängig erweise, wie es bei den festen Körpern der Fall ist. Inzwischen aber ist es gelungen, Temperaturen von weniger als —240° zu erzeugen, und man hat innerhalb auch dieser so sehr weit nach unten verschobenen Grenze gefunden, daß das einfache Ausdehnungsgesetz der Gase jedenfalls so lange bestehen bleibt, als sie eben noch Gase sind. Freilich sind bei dieser Temperatur schon alle früher als „permanent" angesehenen Gase zu Flüssigkeiten oder festen Körpern geworden, so sehr hat also die Temperaturerniedrigung sie, jenem Gesetz entsprechend, zusammengedrückt. Unsere obenstehende Abbildung zeigt ein Stück feste Luft, die bei so tiefen Temperaturen eine derartige Elastizität besitzt, daß der auffallende Hammer zurückspringt.

Es wird gut sein, schon jetzt eine Erklärung dieses Vorganges der Ausdehnung bei Erhöhung der Temperatur innerhalb unserer bisher erworbenen Erfahrungen von den Eigenschaften der Materie zu versuchen. Wollen wir ein Gas auf mechanischem Wege, z. B. durch Auflegen von Gewichten auf einen Stempel, der in einem von dem Gas erfüllten Zylinder luftdicht beweglich ist, so zusammenpressen, wie es sich durch Entziehung einer gewissen Wärmemenge von selbst zusammenziehen würde, so brauchen wir eine bestimmte, durch jene Gewichte

gemessene Kraft dazu. Eine dem Gase zugefügte Wärmemenge kann dieser Kraft das Gleichgewicht halten. Die Wirkung der Wärme ist also selber eine Kraft. Wir können ihre Größe mit der Schwerkraft messen, die wir als Normalmaßstab für alle Naturkräfte wegen ihrer Unveränderlichkeit wählten.

Vor dem Durchbruch der atomistischen Ansicht über den Aufbau der Materie hatte man sich die Wirkung der Wärme etwa so gedacht, daß sie eine Art von Flüssigkeit sei, freilich ohne Schwere, eine jener Imponderabilien, die in den älteren Anschauungen der physikalischen Vorgänge eine so große Rolle spielten. Diese Flüssigkeit sollte sich gewissermaßen zwischen die Poren der Materie saugen, in sie hinüberfließen von einem anderen Körper, in welchem sie mit einem gewissen Überdruck vorhanden war, bis das Wärmegleichgewicht wiederhergestellt ist. Unsere bisherigen Wahrnehmungen an den Gasen ließen sich allenfalls durch diese Annahme erklären. Die Gase wären etwa als Wärmeschwämme zu betrachten, die um so mehr anschwellen, je mehr sie von dieser Flüssigkeit aufsaugen. Die auf dieser Grundanschauung der Wärme als Flüssigkeit aufgebaute Theorie vermochte auch noch einer Anzahl anderer Erscheinungen gerecht zu werden, und selbst heute noch bedient man sich vielfach bei den Untersuchungen dieses anschaulichen Bildes eines Überfließens von Wärme aus einem wärmeren in einen kälteren Körper, um Folgerungen daraus zu ziehen.

Aber abgesehen davon, daß manche Erscheinungen übrigblieben, die auf diese Art nicht zu erklären waren, wie z. B. die Entstehung von Wärme durch Reibung, hat ja bekanntlich die atomistische Anschauung, mit der bisher keine Naturerscheinung im unlöslichen Widerspruch gefunden wurde, mit den unwägbaren Stoffen völlig aufräumen müssen, die für sie ein Widerspruch in sich selbst sind. Alle Kraftäußerung müssen wir für Bewegungen der kleinsten Teile der Materie selbst, welche die Kraft übt, erklären. Auch die Wärme muß also eine Art von Bewegung sein.

Die auf Seite 114 u. f. vorgetragenen einleitenden Betrachtungen zu der sogenannten kinetischen Gastheorie geben uns hierzu sofort einen wichtigen Fingerzeig. Wir sahen dort, daß die Moleküle eines Gases sehr schnelle geradlinige Bewegungen ausführen, wobei sie, in einem Gefäß eingeschlossen, von dessen Begrenzungswänden zurückprallen und durch diese Stöße den beobachteten Gasdruck ausüben. Auch unser menschlicher Körper befindet sich beständig von einem Gase, der atmosphärischen Luft, umgeben. Wäre es nun nicht möglich, daß jener Anprall der Gasmoleküle gegen unsere Haut allein die Ursache der Wärmeempfindung ist? Es ist ja eine alltägliche Erscheinung, daß Stoß Wärme erzeugt, wie der Schlag des Hammers auf den Amboß. Was hier im Großen geschieht, könnte doch auch im Kleinsten stattfinden. Dann wäre Gasdruck und Temperatur des Gases ein und dieselbe Erscheinung und die für den ersteren gefundenen Gesetze müssen auch für die letztere gelten. Wir wollen den Gedanken weiter verfolgen.

Das hauptsächlichste dieser Gesetze ist das von Boyle-Mariotte, das wir schon auf Seite 114 nannten. Es besagt, daß das Volumen einer bestimmten Gasmenge umgekehrt proportional dem auf ihm lastenden Druck ist. Also müßte es auch die Temperatur sein. Dies bestätigt sich in der Tat. Haben wir in einem Gefäß Luft unter einem bestimmten Druck eingeschlossen und lassen nun eine gewisse Menge davon entweichen, so vermindert sich die Temperatur der zurückbleibenden Luft in demselben Verhältnis, wie ihr Druck sich vermindert hat. Wenn man aber die entweichende Luft in ein zweites, vorher luftleeres Gefäß strömen läßt, so wird, wie zuerst Joule gezeigt hat, das letztere Gefäß um ebensoviel wärmer, wie das andere kälter wurde, die Gesamtwärme der, sagen wir, das doppelte Volumen einnehmenden Gasmenge ist

die gleiche geblieben, aber dieselbe verbreitet sich auf den doppelten Raum, so daß die *Temperatur* jedes Teiles nur noch halb so groß ist.

Wenn wir einer bestimmten, in einem Gefäß eingeschlossenen Gasmenge Wärme zuführen, so sucht sie ihr Volumen zu vergrößern. Da dies aber wegen der festen Wände des Gefäßes nicht möglich ist, so erhöht sich entsprechend der Druck. Einen erhöhten Druck aber können wir nach der kinetischen Gastheorie nur durch eine vergrößerte Geschwindigkeit oder genauer Gesamtkraft der Gasmoleküle erklären. Die Temperatur eines Gases sagt uns also etwas über die Geschwindigkeit seiner Moleküle aus, die beim absoluten Nullpunkt dementsprechend auch gleich Null ist. Das Gesetz von Boyle-Mariotte drückte sich durch die Gleichung $vp = v_o p_o$ aus, wenn v und p Volumen und Druck einer bestimmten Gasmenge in einem gewissen Zustande sind, die mit dem Index $_o$ versehenen dagegen einem anderen Zustande derselben Gasmenge entsprechen. Um in diese Beziehungen nun nach den oben beschriebenen Erfahrungen die Temperatur einzuführen, nehmen wir einmal an, v_o und p_o seien Volumen und Druck einer Gasmenge bei 0° und dem Druck einer Atmosphäre, v und p dagegen gelten für eine bestimmte Temperatur t des 100teiligen Thermometers. Wir erhalten dann diese Temperatur durch die einfache Formel $pv = p_o v_o (1 + \alpha t)$, wobei α der Ausdehnungskoeffizient der Gase, also gleich $^1/_{273}$ ist. Das durch diese Gleichung ausgedrückte Gesetz ist nach seinem Entdecker *Gay-Lussac* benannt, der mathematische Ausdruck desselben heißt die *Zustandsgleichung der Gase*. Diese Gleichung läßt sich, wenn man das einfache Verhältnis der Masse zum Volumen berücksichtigt und die absolute Temperatur einführt, auf die einfache Form $vp = mRT$ bringen, wo m die Masse des Gases und R eine für jedes Gas konstante Größe, die sogenannte *Konstante des Gasgesetzes* ist, das durch den zweiten Teil der Gleichung ausgedrückt wird. Die Größe R muß offenbar die mittlere Geschwindigkeit der Gasmoleküle in irgend einer Form enthalten, die mit der Temperatur sich ändert. Denn nach unseren kinetischen Anschauungen hängt der Druck einer bestimmten Masse m nur von dieser Geschwindigkeit ab, da die ausgeübte Stoßkraft immer nur ein Produkt aus Masse und Geschwindigkeit sein kann. In der Tat läßt sich leicht zeigen, daß diese Geschwindigkeit, mit welcher die Moleküle in einem Gase zwischen den sich ihnen entgegenstellenden Hindernissen hin und her pendeln, gleich der Quadratwurzel aus 3RT sein muß. Die Geschwindigkeiten der Moleküle verschiedener Gase verhalten sich also bei gleicher Temperatur wie die Quadratwurzeln aus ihren Konstanten R. So sind diese Konstanten R für Wasserstoff 42313, für Stickstoff 3017, für Sauerstoff 2655, für Kohlensäure 1926 einer bestimmten Einheit. Hieraus berechnen sich die Geschwindigkeiten der Gasmoleküle, wie wir sie bereits auf Seite 116 mitgeteilt haben, also z. B. Wasserstoff zu 1,84 km in der Sekunde, Kohlensäure zu 0,39 km. Es verhalten sich hier $1{,}844 : 0{,}392$ wie $\sqrt{42313 : 1926}$.

Die Dichtigkeit eines Stoffes ist gleich dessen Masse dividiert durch sein Volumen (vgl. S. 68). Es ist $d = \frac{m}{v}$. Finden wir 1 ccm Eisen um ein Bestimmtes schwerer als 1 ccm Wasser, so muß in dem ersteren der Stoff um ebensoviel dichter zusammengedrängt sein. Dasselbe gilt auch für die Gase. Unsere Zustandsgleichung der Gase gibt für diese Dichte $\frac{m}{v} = d = \frac{p}{RT}$. Wir sehen daraus, daß sich die *Gasdichten* umgekehrt verhalten wie ihre Konstanten R, bei gleichem Druck und gleicher Temperatur. Die experimentelle Bestimmung dieser Gasdichte führt also zur Kenntnis der Gaskonstanten und damit auch zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Gasmoleküle. Aus der Gastheorie folgt weiter, daß bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die einzelnen Moleküle eines jeden Gases durchschnittlich gleiche

Abstände voneinander haben müssen, sonst könnten sie sich nicht in gleichem Maß ausdehnen bei einer bestimmten Temperaturerhöhung, die eine entsprechende Vergrößerung der gegenseitigen Entfernungen der Moleküle bedingt. Wenn sich ein Gas unter gleichen äußeren Umständen als dichter erweist als ein anderes, so folgt daraus, daß auch jedes seiner Moleküle dichter ist als die des anderen Gases, weil die nicht mit Materie ausgefüllten Räume zwischen den Molekülen für alle Gase unter sonst gleichen Bedingungen die gleichen sind. Die Gasdichten geben also ein Maß für die Dichtigkeit der Moleküle selbst, das heißt, für ihre Maße oder ihr Gewicht, freilich nur bezogen auf das Gewicht eines beliebig gewählten Moleküls als Einheit, denn wir erhalten ja immer nur Verhältniszahlen durch die Vergleichung der Gasdichten. Ihre experimentelle Bestimmung läßt das Molekular-, bzw. Atomgewicht der betreffenden Grundstoffe oder Verbindungen finden. **Die Gasdichten verhalten sich wie das Gewicht der einzelnen Moleküle.** Dies hat zuerst **Avogadro** als Gesetz formuliert. Finden wir experimentell, daß die Gasdichte des Sauerstoffes 16mal größer ist als die des Wasserstoffes, so ist damit nachgewiesen, daß ein Molekül Sauerstoff auch 16mal schwerer ist als ein Molekül Wasserstoff. Dieses ist ein an sich zweifelloses Resultat, während wir über die eigentlichen Gewichte dieser kleinsten Materieteile nichts Sicheres wissen. Durch Einführung dieses Molekulargewichtes μ in die Zustandsgleichung der Gase und entsprechende Umwandlung der betreffenden konstanten Zahlenwerte erhält man dann $pv = 0{,}0819\ \frac{T}{\mu}$, wobei der Druck in Atmosphären, das Volumen nach Litern und das Molekulargewicht des Wasserstoffes gleich 2 gesetzt ist. Als Einheit der Maße dient das Gramm. Mit Hilfe dieser Formel kann man den Zustand eines Gases unter jeder gegebenen Bedingung vorher berechnen. Einige Beispiele mögen dies erläutern. Wir wünschen zu wissen, wieviel Raum 1 g Wasserstoff bei einem Druck von 1 Atmosphäre und einer Temperatur von 0° C einnimmt. Wir haben dann $T = 273$ und $\mu = 2$; also, da $p = 1$ ist, gibt unsere Formel $v = 273 \times 0{,}0819 : 2 = 11{,}2$ Liter. Man erhält das Volumen eines Grammes irgend eines anderen Gases unter den angegebenen Normalverhältnissen, indem man diese 11,2, genauer 11,15 Liter durch das halbe Molekulargewicht des betreffenden Gases dividiert. So ist z. B. das Molekulargewicht des Sauerstoffes 32. Wir haben also jene 11,15 Liter durch 16 zu dividieren, um zu finden, daß 1 g Sauerstoff bei 0° und 1 Atmosphäre Druck einen Raum von 0,699 Litern einnimmt. Wir wollen nun den Wasserstoff einer Temperatur von -250° aussetzen, so daß $T = 23^\circ$ wird. Das Volumen muß dabei im Verhältnis der Temperatur abnehmen. Wir haben $v = 11{,}2 \times 23 : 273 = 0{,}94$ Liter. Der Wasserstoff hat sich bei dieser Abkühlung also auf etwa ein Zwölftel seines früheren Volumens zusammengezogen.

Die Bestimmung der Molekular-, bzw. Atomgewichte aus den Gasdichten ist für die ganze Anschauung über die molekularen Vorgänge von der größten Wichtigkeit geworden. Viele Erscheinungen in den übrigen Naturgebieten, insbesondere dem der chemischen Verwandtschaften, sind im vollen Einklange mit den wie oben gefundenen Atomgewichten und können nur unter der Annahme einer entsprechenden Verschiedenheit der Masse jener kleinsten Materieteile erklärt werden. Wir werden uns im folgenden noch wiederholt damit zu beschäftigen haben.

c) Wärme und Arbeitsleistung.

Die Wärme als Kraft ist in hervorragendem Maße befähigt, Arbeit zu leisten und wird praktisch in ausgiebigster Weise, z. B. in der Form von Dampfmaschinen, ausgenutzt. Wir wollen nun versuchen, diese Kraft in Beziehung zu ihrer Arbeitsleistung genauer zu bemessen.

Wert für eine spezifische Wärme bei konstantem Druck (von 1 Atmosphäre) gilt, den man dann durch das Symbol c_p zu bezeichnen pflegt. Unter den anderen spezifischen Wärmen unterscheidet man noch die bei konstantem Volumen (c_v) und findet für Luft $c_p = 0{,}2375$ und $c_v = 0{,}1690$. Dies bedeutet also, daß wir einem Gramm Luft unter dem Druck einer Atmosphäre 0,2375 Teile derjenigen Wärmemenge zuführen müssen, die zur Erhöhung der Temperatur eines Grammes Wasser um einen Grad genügt, um den gleichen Effekt bei der Luft zu erzielen. Wenn wir dagegen dieses Gramm Luft vorher abschließen, so daß es sich bei der Erwärmung nicht ausdehnen kann, so brauchen wir ihm nur 0,169 Kalorien zuzuführen, um seine Temperatur um einen Grad zu steigern. Die Differenz zwischen diesen beiden spezifischen Wärmen entspricht offenbar der Arbeitsleistung, mit welcher die Ausdehnung des Gases die Luftsäule über ihm hebt. Diesen Gedankengang führte zuerst der Heilbronner Arzt Robert Mayer (s. die nebenstehende Abbildung) aus, der dadurch zum Begründer der modernen Wärmetheorie geworden ist. Wir wollen hier seinen Entwickelungen, die zur Bestimmung des Wertes des Wärmeäquivalentes führten, in der ursprünglichen Form folgen, die gar nicht klarer sein könnte; nur setzen wir die dem heutigen Forschungsstand entsprechenden Zahlenwerte in die Rechnung ein.


Robert Mayer. Nach Werckmeister, „Das 19. Jahrhundert in Bildnissen".

„1 ccm Luft wiegt 0,001293 g. Erhöhen wir ihre Temperatur um 1°, indem wir den Druck von 1 Atmosphäre auf ihr ruhen lassen, so dehnt sie sich, wie wir wissen, um $^1/_{273}$ aus, und um ebensoviel wird ein Gewicht von 1033 g, welches die Luftsäule über jenem Kubikzentimeter wiegt, gehoben. Um dieses zu leisten, während zugleich sich das Kubikzentimeter Luft um 1° erwärmt, müssen wir ihm so viel Kalorien zuführen, als seine Masse multipliziert mit seiner spezifischen Wärme bei konstantem Druck beträgt, also $0{,}001293 \times 0{,}2375 = 0{,}0003070$ cal. Zur Temperaturerhöhung ohne Arbeitsleistung gebraucht aber unser Kubikzentimeter Luft nur so viel Kalorien, wie seine Masse multipliziert mit seiner spezifischen Wärme bei konstantem Volumen ausmacht, also $0{,}001293 \times 0{,}169 = 0{,}0002185$ cal. Die Differenz zwischen beiden ist zur Arbeitsleistung allein nötig. Folglich heben $0{,}0003070 - 0{,}0002185 = 0{,}0000885$

cal. ein Gewicht von 1033 g um $^1/_{273}$ cm, oder 1 cal. hebt ein Gewicht von 1033 g um $^1/_{273}$: 0,0000885 = 41,4 cm, oder endlich ein Gewicht von 1 g um 41,4 × 1033 = 428 m. Diese letztere Zahl ist das sogenannte Äquivalent der Wärme; es besagt, daß eine Wärmemenge, die 1 ccm Wasser von 15 auf 16° erwärmt, auf irgend eine Weise in Arbeit verwandelt, im stande ist, das Gewicht eines Grammes um 428 m zu heben. Um uns eine Vorstellung von der Größe dieser Wärmekraft zu machen, wollen wir einmal 500 g Wasser auf einem gewöhnlichen Gaskocher eine Minute lang erwärmen, wobei die Temperatur des Wassers um etwa 15° zugenommen hat. Wir haben ihm demnach in dieser Zeit 15 × 500 = 7500 Kalorien zugeführt, mit denen wir ein Grammgewicht um 7500 × 428 = 3,210,000 m oder 100 kg um 32,1 m in dieser einen Minute heben könnten, wenn wir eine vollkommene, d. h. ohne Verlust arbeitende Maschine mit diesem Gaskocher heizten."

Vergegenwärtigen wir uns unsere Anschauung von der Natur der Wärmeerscheinungen als einer Bewegung ihrer kleinsten Teilchen, so erkennen wir auch sogleich die hohe Wichtigkeit dieses Nachweises einer ganz bestimmten Beziehung zwischen Wärmemenge und Arbeitsleistung, da wir damit zugleich ein Maß für die inneren Kräfte der molekularen Bewegungen erhalten, die sich unserer direkten Wahrnehmung entziehen.

d) Spezifische und Atomwärme.

Es liegt die Frage nahe, wie man sich die molekularen Vorgänge zu denken hat, durch die sich Wärme in Arbeit verwandelt. Es sind zwei verschiedene Wirkungsarten, mit denen eine in einen Körper eingeführte Wärmemenge in die Erscheinung treten kann. Erstens erhöht sie die Temperatur und zweitens dehnt sie den Körper aus und befähigt ihn auf diese Weise, nach außen hin Arbeit zu leisten. Diese beiden Wirkungen können nach unseren Grundanschauungen nur in zwei verschiedenen Arten von Bewegungen der kleinsten Teile des Körpers ihren Grund haben. Von diesen beiden Bewegungsarten kennen wir bereits die eine als die geradlinig fortschreitende Bewegung der Gasmoleküle, durch welche ihr Druck gegen die Gefäßwände entsteht. Da dieser Druck mit der Temperatur eines Gases proportional wächst, so ist also diese fortschreitende Bewegung der Gasmoleküle die Ursache der Temperaturerscheinungen allein.

Wir sahen schon früher, daß diese Geschwindigkeiten der Gasmoleküle sehr große sind, bei Wasserstoff beinahe 2 km in der Sekunde, bei Luft immer noch mehr als 300 m. Mit solchen Geschwindigkeiten aber verteilen sich diese Gase keineswegs im Raume, wenn man sie sich selbst überläßt. Ihre Ausbreitung findet also nicht nur Hindernisse an den Gefäßwänden, sondern auch namentlich in sich selbst. Bedenkt man, daß, wie wir schon auf Seite 117 mitteilten, in einem einzigen Kubikmillimeter Kohlensäure 58,000 Billionen ihrer Moleküle enthalten sein müssen, so begreift man es wohl, daß diese sich gegenseitig in ihrer fortschreitenden Bewegung hemmen, voneinander zurückprallen und demnach eine pendelnde Bewegung um eine Mittellage ausführen werden. Es ist ausgerechnet worden, daß ein Luftmolekül in jeder Sekunde, unter normalen Druck- und Temperaturverhältnissen, nicht weniger als 4700 Millionen mal mit seinesgleichen zusammenstößt. Hier haben wir also bereits die beiden gesuchten Bewegungen vor uns, die fortschreitende und die pendelnde. Unsere stets im Auge behaltene Parallele zwischen den molekularen und den kosmischen Bewegungen legt es uns nahe, daß diese pendelnde Bewegung in den allermeisten Fällen eine kreisende sein wird, denen der Planeten um ihren gemeinsamen Schwerpunkt vergleichbar. Dehnen sich die Durchmesser dieser Bahnen aus, so nimmt jedes einzelne dieser molekularen Sonnensysteme einen größeren Raum für sich in

Anspruch und deshalb auch der ganze Körper: er dehnt sich aus und verrichtet dabei Arbeit. Die Veränderung der Ausdehnung dieser molekularen Bahnen ist ein Maß für die gesuchte Arbeit, die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle in diesen Bahnen ein solches für ihre Temperatur. Erwärmt man ein Gas bei konstant erhaltenem Volumen, so können sich die Bahnen seiner Moleküle nicht ausdehnen; alle Wärme kann also nur zur Vergrößerung der Bahngeschwindigkeit verwendet werden, d. h. zur Erhöhung der Temperatur. Läßt man aber bei konstantem Druck eine Vergrößerung der Bahnausdehnungen zu und verlangt zugleich, daß die mittlere Geschwindigkeit in diesen größeren Bahnen sich nicht ändere, die Temperatur somit dieselbe werden soll, wie in dem Falle des konstant bleibenden Volumens, so müssen wir der Masse offenbar noch weitere Wärme hinzufügen, weil die gleichschnelle Bewegung in den größeren Bahnen dieses besonderen Kraftaufwandes bedarf. Diese noch hinzukommende Wärme bezeichneten wir vorhin als die Differenz $c_p - c_v$, die dem Arbeitsäquivalent der Wärme entspricht. Sie ist also ein Maß für die kreisende Bewegung der Moleküle in ihren Bahnen.

Den Vorgang der Übertragung von Wärme zwischen den Körpern haben wir uns hiernach als einen Ausgleich der Bahnbewegungsgeschwindigkeiten der Moleküle dieser Körper vorzustellen. Tauchen wir ein heißes Stück Eisen in kälteres Wasser, so bewirken wir dadurch, daß die Eisenmoleküle schneller umlaufen als die des Wassers. Wenn nun ein Eisenmolekül mit einem Wassermolekül zusammenstößt, so muß nach den elementaren Prinzipien der Mechanik das eine dem anderen von seiner größeren Geschwindigkeit etwas mitteilen, und dies muß sich so lange fortsetzen, bis alle Moleküle sowohl des Eisens als des Wassers die gleiche Bahngeschwindigkeit, d. h. die gleiche Temperatur, haben.

Je näher die einzelnen Massenteilchen der Körper sich aneinander drängen, sei es nun, daß ein von außen geübter Druck dies bedingt, oder daß die inneren molekularen Anziehungen, welche in dem Wechsel der Aggregatzustände zutage treten, die Moleküle zusammenhalten, desto weniger kann die Übertragung der Geschwindigkeiten bei der Wärmezufuhr die Bahnumfänge noch weiter vergrößern. Desto mehr wird also die eingeführte Wärmemenge zur Temperaturerhöhung verwendet, um so weniger zur Ausdehnung oder zur Arbeitsleistung. Je dichter ein Körper ist, desto weniger unterscheiden sich seine beiden spezifischen Wärmen, die er bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen hat, voneinander, desto geringer ist ihr Arbeitsäquivalent. Unsere theoretischen Betrachtungen allein haben diese Notwendigkeit ergeben, und das Experiment bestätigt sie vollkommen. Die Gase sind am ausdehnungsfähigsten und deshalb am meisten zur Arbeitsleistung in Wärmemaschinen geeignet; bei den festen Körpern ist die Ausdehnbarkeit durch Wärme meist nur noch so gering, daß sich ihre beiden spezifischen Wärmen praktisch kaum noch voneinander unterscheiden.

Bei den festen Körpern tritt nun in Bezug auf ihre spezifischen Wärmen noch eine sehr interessante und für unsere kinetische Anschauung wichtige Beziehung auf. Es zeigt sich, daß das Produkt aus ihrer spezifischen Wärme und ihrem Atomgewicht eine Konstante ist. Man nennt dieses Produkt die Atomwärme und das soeben ausgesprochene Gesetz das von Dulong und Petit. Wir verstehen sofort seine Notwendigkeit: um einem Körper eine bestimmte Geschwindigkeit zu erteilen, müssen wir um so viel mehr Kraft auf ihn wirken lassen, je schwerer er ist; das ist ein elementares Gesetz der Mechanik. Die spezifische Wärme aber drückt ja diese Kraft aus, mit der den kleinsten Teilen des Stoffes eine bestimmte, der Temperatur entsprechende Geschwindigkeit erteilt werden soll, und das Atomgewicht sagt aus, um wieviel diese kleinsten Teile der verschiedenen Stoffe schwerer sind als ein Vergleichsstoff, für den man

den Wasserstoff zu nehmen pflegt. Wir geben im folgenden einige dieses Gesetz veranschaulichende Zahlen:

	Atomgewicht = a	Spezifische Wärme = c	Produkt = ac
Lithium	7,0	0,941	6,60
Magnesium	24,4	0,250	6,09
Nickel	58,5	0,109	6,38
Silber	107,9	0,057	6,15
Cerium	141,5	0,045	6,33
Blei	206,9	0,031	6,49
Uran	239,0	0,028	6,65

Aus dieser Zusammenstellung sehen wir, daß, so verschieden auch die Atomgewichte der einzelnen Stoffe sind, sie doch alle, mit ihren spezifischen Wärmefaktoren multipliziert, wenigstens nahezu ein und dieselbe Zahl ergeben. Diese ist im Mittel von 45 festen chemischen Elementen gleich 6,26 und wird die mittlere Atomwärme dieser Stoffe genannt. Denken wir uns die Atome der chemischen Elemente ihrerseits wieder aus noch kleineren Teilen zusammengesetzt, die wir früher schon einmal Uratome genannt haben, die also weiter keine Eigenschaft als die der Raumausfüllung und Bewegung haben sollen, so müßte das Atomgewicht die Anzahl dieser Uratome in jedem der verschiedenen chemischen Atome angeben, und jene Atomwärme drückt dann die Bewegungsgröße jener Uratome aus. Ein chemisches Atom, das aus 100 jener Uratome zusammengesetzt ist, setzt anderseits einer von außen her eindringenden Bewegung ein hundertfach größeres Trägheitsmoment entgegen als ein einatomiges Element, seine spezifische Wärme muß also im gleichen Verhältnisse kleiner werden.

Die oben gegebene Zahlenreihe für die Atomwärmen zeigt indes für die verschiedenen Elemente keine völlige Übereinstimmung. Die mittlere Abweichung der untersuchten 45 Elemente beträgt etwa 5 Prozent des Mittelwertes selbst. Manche der Abweichungen mögen sich aus der Unsicherheit der experimentellen Bestimmung der zugehörigen Werte wohl erklären lassen, aber bei weitem nicht alle. Drei feste Elemente, der Kohlenstoff als Diamant, das Bor und das Beryllium, die von den vorerwähnten 45 Elementen von vornherein für die Mittelbildung ausgeschlossen sind, zeigen sogar Atomwärmen, die nur etwa den vierten Teil beim Diamant, bei den anderen beiden Elementen ungefähr die Hälfte des Mittelwertes aus den anderen Elementen erreichen. Ferner ergibt sich, daß die Atomwärmen der Gase viel geringer sind und unter sich weniger übereinstimmen als die der festen Körper. Dies muß uns um so mehr auffallen, als wir bisher gerade bei den Gasen immer eine größere Einfachheit der Verhältnisse wahrgenommen hatten. Alle diese Erfahrungen zeigen, daß das Gesetz von Dulong und Petit wohl an sich bestehen müsse, daß aber für jeden einzelnen Stoff noch besondere Wirkungen hinzutreten, die die Konstanten der Atomwärme einer individuellen Korrektion unterwerfen.

Wir können die Ursache für diese besonderen Wirkungen nur in dem ungleichen Aufbau der Moleküle der verschiedenen chemischen Elemente suchen. Um wieder zur besseren Veranschaulichung unsern kosmischen Vergleich herbeizuziehen, haben wir die Moleküle bis jetzt als einheitliche Weltkörper betrachtet, die um einen Schwerpunkt kreisen. Aber es ist uns bereits bekannt, daß die Moleküle wieder aus Atomen zusammengesetzt sind. Solange es sich hier nur um die Atome des Chemikers handelt, wissen wir, daß sie durch dessen Experimente aus ihren Verbindungen in den Molekülen verhältnismäßig leicht getrennt werden können. Die Atome sind gewissermaßen tertiäre Körper in den molekularen Sonnensystemen, Trabanten, welche in den Systemen der Molekülplaneten wie diese um den gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Im

allgemeinen können nur durch die in diese feinsten Maschen des Atomgewebes der Materie eindringenden chemischen Kräfte diese Gruppierungen der tertiären Körper, der Atome in den Molekülen, verändert werden. Aber die chemischen Vorgänge zeigen deutlich, daß die Wärme, ebenso wie sie die Bahnen der Moleküle um ihre Mittellage vergrößert, auch die Umlaufszeit der Atomtrabanten im gleichen Sinne beeinflußt. Die Wärme lockert den Zusammenhang der Atome in ihren Molekülen und erleichtert dadurch die Auflösung chemischer Verbindungen, d. h. die Andersgruppierung der Atome.

Die Ausnahmen von der Regel in Bezug auf jene Atomwärmen scheinen diese in der Tat nur bestätigen zu sollen. So zeigen neuere Untersuchungen, daß die Unterschiede zwischen den Atomwärmen der verschiedenen Gase mehr und mehr verschwinden, je mehr dieselben durch Erniedrigung der Temperatur zusammengedrückt werden, wodurch ja, wie wir wissen, die intermolekularen Wirkungen vermindert werden müssen, die nach unserer Anschauung jene Unterschiede hervorbringen. Bei dem Kohlenstoff endlich, der sich als Diamant jedenfalls unter ganz abnormen Druck- und Temperaturverhältnissen auskristallisiert hat, steigert sich die Atomwärme bei starker Erhitzung und nähert sich dann dem Mittelwert aus den anderen festen Elementen. Seine Atomwärme bei 0° ist 1,76, bei 1000° bereits 5,5; den Normalwert fanden wir oben gleich 6,26. Ähnliches findet beim Bor statt.



Der Nebel Messier 74 in den Fischen. Photographiert von Isaak Roberts. Nach W. Meyer, „Das Weltgebäude".

Zu den das Gesetz von Dulong und Petit störenden Einflüssen kommen noch die der gegenseitigen Anziehungskraft der Moleküle. Denn zwischen ihren Massenatomen schwirren ja, nach der früher entwickelten Hypothese, noch die ganz bedeutend kleineren Uratome hindurch, die die allgemeine Anziehung bewirken. Man glaubt nun annehmen zu dürfen, daß in den Gasen die Moleküle so weit voneinander abstehen, daß ihre gegenseitige Anziehungskraft verschwindet, oder daß sie, um unserer kinetischen Anschauung treu zu bleiben, keinen merklichen Gravitationsschatten für den Strom der Ätheratome aufeinander werfen. Bei den Flüssigkeiten dagegen tritt die molekulare Anziehungskraft schon deutlich hervor und kann sich bei den soliden Körpern bis zu fast unüberwindlicher Festigkeit steigern. Das Zusammenspiel dieser Schwerkraft mit der Wärme bewirkt den Übergang der Körper in ihre drei verschiedenen Aggregatzustände.

Die Temperaturerniedrigung allein würde niemals ein Zusammenziehen eines Gases bewirken. Sie verkleinert ja nur die Schwingungsweiten der Moleküle. Befände sich ein Gas im freien Weltraume, so könnte es trotz der sehr niedrigen Temperatur desselben doch in sehr fein verteiltem Zustande verharren, wofür die zahlreichen Nebelflecke in den Himmelsräumen

Zeugnis ablegen, die aus Gasen von uns bekannter Art in ungemein dünn verteiltem Zustande bestehen. Die langsame Zusammenziehung dieser Gasmengen, die den Weltbildungsprozeß veranlaßt, geschieht nicht unter dem Einfluß von abnehmender Wärme, sondern durch die eigene innere Anziehung ihrer Masse. Die Verdichtung ist in diesem Fall eine Wärmequelle. Wir kommen auch hierauf zurück.

Wenn sich hier auf der Erdoberfläche ein Gas durch Abkühlung verdichtet, so geschieht dies nur infolge des auf ihm lastenden Druckes unserer Atmosphäre, welche die Moleküle des Gases so weit zusammenschiebt, als es ihre Wärmebewegungen gestatten. Schließlich treten dann die Moleküle so nahe zusammen, daß sie eine gegenseitige Anziehung aufeinander ausüben können; Schwerkraft und Wärme treten nun in Konkurrenz miteinander, bis ein gewisser Ausgleich eintritt. Da wir wissen, daß die Anziehungskraft mit dem Quadrate der Annäherung wächst, begreifen wir, daß der Übergang von einem in den anderen Aggregatzustand ziemlich schnell eintritt, und wir sehen auch, daß er von dem äußeren Druck abhängig sein muß, weil er ja außerhalb unserer Atmosphäre im Weltenraum überhaupt nicht stattfindet, wenn nicht kosmische Dimensionen der in Betracht kommenden Masse die innere Anziehungskraft größer werden lassen als die von der Wärme ausgeübte Kraft.

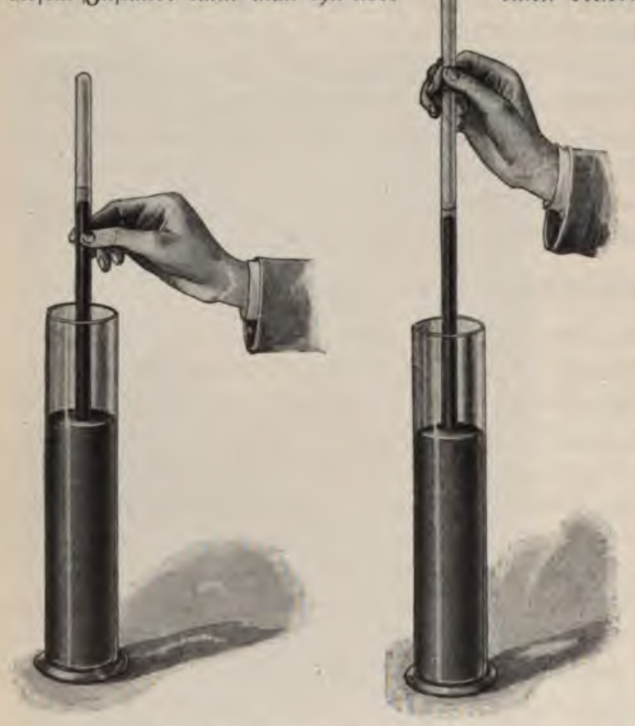
e) Die Aggregatzustände und die Temperatur.

Der Übergang in den höheren, freieren Aggregatzustand, etwa aus dem Flüssigen zum Gasförmigen, geht bei jeder Temperatur bis zu einem gewissen maximalen Drucke vor sich. Wasser siedet zwar erst unter normalem Druck bei 100°, aber es verdunstet schon bei wesentlich niedrigeren Temperaturen langsam, ja, selbst Eis verdunstet, d. h. es geht vom festen direkt in den gasförmigen Zustand über, ohne inzwischen flüssig geworden zu sein. Selbst die festen Metalle müssen bei gewöhnlicher Temperatur in minimalen Mengen verdunsten; sie haben einen ihnen eigentümlichen Geruch, der beweist, daß Partikelchen von ihnen in unser Geruchsorgan gelangen. Wir erklären uns diesen Vorgang als eine Art von Diffusion. (Siehe S. 123.)

Um die Vorgänge bei der Verdampfung von Flüssigkeiten unter veränderten Bedingungen kennen zu lernen, machen wir folgendes Experiment. Wir gießen in eine Röhre von mehr als 760 mm Länge (Barometerröhre) etwas Wasser und machen aus ihr durch Füllen mit Quecksilber und Umstülpen in ein mit dieser metallischen Flüssigkeit gefülltes Gefäß einen Barometer. Alsdann bemerken wir, daß sein Stand unter dem eines richtigen Barometers bleibt, und zwar, wenn die Temperatur 20° ist, um 17,4 mm. Der Unterschied rührt von Wasserdampf her, der sich aus dem Wasser in der Röhre gebildet hat und nun die „Torricellische Leere" ausfüllt. Heben wir die Röhre weiter aus dem Quecksilber (s. die Abbildung, S. 168), so verkleinert sich die Wassermenge, welche sich zwischen Quecksilber und Wasserdampf befindet, aber die Höhe der Quecksilbersäule, die dem inneren Druck des Wasserdampfes über ihr das Gleichgewicht hält, nimmt weder zu noch ab. Es ändert sich also nur die Menge des Wasserdampfes, während sein Druck derselbe bleibt. Man sagt, daß unter solchen Bedingungen der Wasserdampf sich im gesättigten Zustande befindet. Würde man künstlich den Druck vergrößern, den Wasserdampf also zusammenzupressen versuchen, so würde sich statt dessen eine entsprechende Menge von Wasserdampf wieder zu Wasser verdichten, der übrigbleibende Wasserdampf aber seine frühere Dichte beibehalten. Erhöht man aber die Temperatur dieses gesättigten Dampfes und damit indirekt den Druck desselben, so sinkt die Quecksilbersäule. Der Wasserdampf kondensiert sich also in diesem Falle nicht; er nimmt jetzt einen größeren Raum ein als zuvor. Wenn nun die Röhre

gehoben wird, so verdampft dadurch so viel Wasser, daß trotz der Volumenvergrößerung der durch die Temperaturerhöhung gesteigerte Druck derselbe bleibt. Der Druck des gesättigten Dampfes zeigt sich durchaus nur abhängig von der Temperatur, er verhält sich also anders wie die echten Gase, die mit der Temperatur sich ausdehnen, ihr Volumen ändern.

Solche Volumenänderung findet aber auch mit dem Dampf von dem Augenblick an statt, in welchem das letzte Wasser in der Röhre verdampft ist, entweder durch Vergrößerung des Raumes, in welchem sich der bis dahin gesättigte Dampf ausbreiten konnte, oder durch Erhöhung der Temperatur. Man nennt deshalb solchen Dampf **überhitzt**. In diesem Zustande kann man ihn über einen beliebigen Raum ausbreiten und jeder Temperatur aussetzen, vorausgesetzt, daß dadurch sein Druck nicht größer wird als der des gesättigten Dampfes, weil er sich dann verflüssigt. **Der überhitzte Dampf folgt dem Gesetz von Gay-Lussac** (S. 156), nach welchem Druck und Volumen von der Temperatur abhängig sind. Da dieses Gesetz für die früher sogenannten permanenten Gase gilt, so vermutete man bereits lange, daß diese gleichfalls nur als stark überhitzte Dämpfe anzusehen seien, was die moderne Experimentierkunst bekanntlich auch erwiesen hat, indem sie diese Gase bei sehr niedrigen Temperaturen zu Flüssigkeiten verdichten konnte.



Dampfspannungsversuch. Vgl. Text, S. 167.

Aus dem Vorangegangenen folgt, daß der Druck des gesättigten Dampfes bei einer bestimmten Temperatur ein maximaler ist. Man bezeichnet ihn als die **Spannkraft des Dampfes**. Für Wasserdampf und die Temperatur von 20° haben wir den Wert der Spannkraft bereits mit 17,4 mm ermittelt, für einige andere Temperaturen und Stoffe ist die Spannkraft aus der folgenden Tabelle zu ersehen:

Temperatur	Wasserdampf	Ätherdampf	Quecksilberdampf
−20°	0,9 mm	67,5 mm	—
0	4,5 -	183,3 -	0,01 mm
+20	17,4 -	433,3 -	0,02 -
40	54,9 -	909,6 -	0,03 -
60	148,7 -	1728,5 -	0,05 -
80	354,3 -	3024,4 -	0,10 -
100	760,0 -	4950,8 -	0,21 -
120°	1,491,3 mm	7702,2 mm	0,78 mm
160	4,651,6 -	—	4,38 -
200	11,689,0 -	—	18,25 -
300	—	—	242,15 -
400	—	—	1587,96 -
500	—	—	6520,25 -

Man sieht aus diesen Zahlen, wie die Spannkräfte mit der Temperatur mächtig zunehmen, und daß sie bei leichteren Stoffen für dieselbe Temperatur größer sind wie bei den spezifisch schwereren. Die Zahlen selbst geben die Höhe einer Quecksilbersäule im Barometerrohr an, welche der Spannung des gesättigten Dampfes bei der betreffenden Temperatur das Gleichgewicht hält. Eine Dampfbildung kann noch nicht stattfinden; die molekulare Wärmebewegung aber beginnt bei diesem Druck die im flüssigen Zustande fester verketteten Moleküle auseinander zu reißen und erteilt ihnen dieselben Geschwindigkeiten und Bahnausdehnungen, die sie den freien Molekülen der Gase vorschreibt. Da nun im Inneren einer frei dem Atmosphärendruck überlassenen Flüssigkeit dieser gleiche Druck überall herrscht, so kann sich offenbar in ihr erst dann Dampf zu bilden beginnen, wenn seine Spannung mindestens dem Atmosphärendruck gleichkommt und damit über diesen die Oberhand gewinnt. Das Wasser siedet bei einer Temperatur, deren Dampfspannung dem Atmosphärendruck entspricht. Bei dem normalen Druck von 760 mm, also einer Atmosphäre, liegt demnach die Siedetemperatur des Wassers bei 100°. Würde ein Druck von 2 Atmosphären auf ihm lasten, so siedet Wasser, wie aus unserer Tabelle auf der vorigen Seite zu ersehen ist, erst bei etwa 120°, dagegen auf hohen Bergen, auf denen der Luftdruck wesentlich geringer ist, schon bei Temperaturen unter 100°, auf der Höhe der Jungfrau z. B. bei etwa 85°. Ein Grad Unterschied in der Siedetemperatur (Siedepunkt) entspricht hier ungefähr einer Druckerniedrigung von 16 mm, diese einer Höhendifferenz von etwa 270 m. Man wird mit einem ganz gewöhnlichen Thermometer den Siedepunkt meistens bis auf einen halben Grad genau bestimmen können, also damit auch die Höhe über dem Meer auf rund 100—150 m. Reisende wenden zur Kontrolle ihres Barometers diese Methode der Höhenmessung gelegentlich an.

Die bewirtschafteten Alpenvereinshütten liegen meist in Höhen zwischen 2500 und 3000 m. Das Wasser siedet hier also etwa bei 90°. Man braucht dort folglich an Brennmaterial in der Küche etwa den zehnten Teil weniger als im Tal.

Die Erhöhung des Siedepunktes bei höherem Druck ist die Ursache der imposanten Geisererscheinungen (s. die Abbildung, S. 170), die lange Zeit zu den rätselhaftesten Naturwundern zählten. Im amerikanischen Felsengebirge gibt es Geiser in großer Anzahl, die in regelmäßigen Zwischenräumen von einem Bruchteil einer Minute und mehreren Stunden große Mengen kochenden Wassers plötzlich oft bis gegen 100 m fontänenartig in die Luft schleudern, dies einige Zeit lang, bei dem Old Faithfull ziemlich genau 5 Minuten, fortsetzen und dann ebenso plötzlich wieder in völlige Ruhe kommen. Sie bilden ein unten trichterförmig verengtes Becken voll heißen Wassers, das sich in der Tiefe wie in einem senkrechten Brunnenrohre fortsetzt. In geologisch noch nicht weit zurückliegenden Zeiten war das Gebiet des Felsengebirges der Schauplatz einer ungeheueren vulkanischen Tätigkeit, und diese tiefen Löcher sind wahrscheinlich die Auswurfsöffnungen einstmaliger Vulkane. Gewaltige Lavaströme, die im Inneren noch heiß sind, bedecken das Land, überall sprudeln heiße Quellen daraus hervor. Dieses heiße Wasser sammelt sich in den alten Vulkanschloten und füllt sie schließlich bis oben an. Ist nun ihre Tiefe größer als 10,3 m, der Höhe des Wasserbarometers, so lastet auf dem Wasser in dieser Tiefe ein Druck von mehr als 2 Atmosphären, denn es hat jene Wassersäule und die Luftsäule der Atmosphäre über sich. Sehen wir von der Höhenlage ab, in der diese Geiser des Yellowstoneparkes auftreten, so ergibt unsere Tafel der Dampfspannungen, daß das Wasser in dem Brunnenrohre des Geisers in einer Tiefe von etwa 10 m erst bei 120° sieden kann. Nach der letzten Eruption hat sich nun das Wasser überall unter den Siedepunkt abgekühlt und ist durch den Trichter in den

Schlund zurückgeflossen, soweit es nicht verdampft oder verspritzt ist. Neues heißes Wasser fließt beständig aus der Tiefe zu, ebenso erhitzt das umgebende heiße Lavagestein das Wasser in dem Rohre. Diese Erhitzung findet von unten nach oben statt. Obgleich es oben leichter sieden würde als unten, kühlt es sich doch oben zu viel ab, und erst bei einer ganz bestimmten Tiefe und nach einer ganz bestimmten seit der letzten Eruption verflossenen Zeit kann, da die Wärmezufuhr eine konstante ist, die für diese Tiefe nötige Siedetemperatur eintreten. Der entstehende Dampf schleudert nun die über ihm befindliche Wassersäule vor sich her und läßt so die Eruption beginnen. Dadurch aber wird das unter dieser Tiefenlage befindliche Wasser von dem über ihm lagernden Drucke der emporgeschleuderten Wassersäule befreit und kann jetzt gleichfalls



Geiser im Yellowstonepark. Vgl. Text, S. 169.

sieden. In immer größere Tiefen dringt der Siedeprozeß, je mehr Wasser ausgeworfen wird; er muß fortdauern, bis er das letzte Wasser am Boden des Brunnenrohres ergriffen hat, dann hört die Eruption plötzlich auf, da sich nun alles Wasser an der Luft abgekühlt hat und zurückfließt. Ist diese Erklärung der Geisererscheinungen richtig, so muß sich die Häufigkeit der Eruptionen offenbar vom Barometerstand abhängig zeigen, wie jeder andere Siedeprozeß: bei niederem Barometerstande werden die Ausbrüche häufiger stattfinden, was durch die Beobachtung auch bestätigt wurde.

Im Zusammenhang mit den hier besprochenen molekularen Vorgängen steht auch eine merkwürdige Erscheinung bei den Geisern, an deren Tatsächlichkeit man lange gezweifelt hatte. Es war einmal zufällig ein Stück Seife in einen Geiser gefallen, worauf dieser sofort in Eruption geriet, viel früher, als er „fällig" war. Viele späteren Wiederholungen dieses Versuches hatten den gleichen Erfolg. Man mußte auf den ersten Blick in der Tat höchst erstaunt darüber sein, daß solch eine geringfügige Beimengung ein so mächtiges Phänomen sollte hervorlocken können. Im vorhergehenden haben wir aber erkannt, daß in den Geisern zwei Naturgewalten,

die Schwerkraft (der Atmosphären- und Wasserdruck) und die Wärmekraft (die Dampfspannung) sich bis zum Ausbruch im labilen Gleichgewichte halten, wie ein Stab auf einer Messerschneide balanciert, und daß das geringste Übergewicht nach der Spannungsseite hin den Ausbruch einleiten muß. Durch die Lösung der Seife im Wasser wird ein Teil desselben in Schaum verwandelt und dadurch spezifisch leichter. Der Siedepunkt wird auf ein höheres Niveau in der Geiserröhre verlegt; das Wasser beginnt hier früher zu sieden, als es ohne die Beimischung geschehen wäre, und der einmal, wenn auch nur in einem ganz kleinen Gebiet, eingeleitete Siedeprozeß kann nun wegen der unaufhaltsam fortschreitenden Druckverminderung nicht wieder aufhören, bis alles Wasser vom Ausbruch ergriffen worden ist.

Ähnliche Vorgänge, bei denen eine scheinbar verschwindend kleine Kraft eine ungeheure Wirkung auslösen kann, nimmt man in der Natur ja sehr häufig wahr, wie z. B. bei der Explosion der Sprengstoffe durch den Zündfunken. In allen diesen Fällen halten sich zwei oder mehr Kräfte gegenseitig im labilen Gleichgewichte.



Leidenfrostsches Phänomen.

Im Zusammenhange mit den oben geschilderten Vorgängen steht jedenfalls auch die eigentümliche Erscheinung des sogenannten Siede-Verzuges. Man beobachtet oft, daß Wasser, welches vorher schon einmal ausgekocht, also möglichst luftleer gemacht und auch sonst von allen mechanischen Beimischungen gesäubert ist, unter normalem Druck doch weit über 100° erhitzt werden kann, ohne daß es zu kochen beginnt. Man hat unter besonderer Vorsicht die Temperatur des so überhitzten Wassers bis auf 150° gebracht. Wie weit man diese Überhitzung in jedem Falle treiben kann, scheint von unberechenbaren Umständen abzuhängen. Dann aber beginnt die Dampfbildung gleichzeitig innerhalb der ganzen Flüssigkeit mit explosiver Gewalt und die Temperatur des etwa übrigbleibenden Wassers fällt schnell auf die normalen 100° herab. Man sieht hieraus, wie gewaltig sich die beiden hier miteinander ringenden Naturkräfte gewissermaßen umklammert halten, ehe die eine nachgibt. Der allergeringfügigste Anlaß bringt das Übergewicht zum Ausgleich. Taucht man in solch überhitztes Wasser irgend einen kleinen festen Körper, z. B. ein Stückchen Draht, an welchem immer eine dünne Lufthülle haftet, so genügt dies, um die plötzliche Dampfbildung herbeizuführen.

Mit dieser Erscheinung verwandt ist das Leidenfrostsche Phänomen (s. die obenstehende Abbildung). Man kann in eine rotglühende Metallschale Wasser tropfenweise schütten, ohne daß dieses zu sieden beginnt. Ein einzelner Tropfen rollt in lebhafter Bewegung über die glühende Fläche hin und verdampft dabei nur sehr langsam. Glückt es, mehr Wasser in die Schale zu bringen, so rundet es sich ab wie Quecksilber. Erst wenn man die Schale sich abkühlen läßt, beginnt das Sieden so plötzlich, daß das Wasser wie ein explodierender Körper auseinander geschleudert wird. Dies ist auch die Ursache mancher Dampfkesselexplosionen geworden. Wenn nur noch so wenig Wasser im Kessel ist, daß ein Teil der Feuerfläche über dem Wasser bleibt, so kann diese glühend werden und dadurch das Leidenfrostsche Phänomen herbeiführen. Das Wasser wird dabei offenbar von den glühenden Kesselwänden durch eine Dampfschicht getrennt, die unter abnormen Spannungen steht und diese eine Zeit lang dem Wasser mitteilt. Durch solche

Verhältnisse ist auch die überraschende Tatsache zu erklären, daß man die angefeuchtete Hand einen Augenblick lang in glühendflüssiges Eisen tauchen kann, ohne sich zu verbrennen, wovon Arbeiter in den Hüttenwerken gelegentlich zum Staunen der Zuschauer Gebrauch machen.

Da wir sahen, daß Druckverminderung das Sieden beschleunigt, so sollte man meinen, daß Druckerhöhung, wenn sie nur weit genug getrieben wird, jeden Dampf und jedes Gas flüssig machen müsse. Dies trifft indes nicht zu; es gelingt durchaus nicht, bei einer beliebigen Temperatur einen gasförmigen Körper zu einer Flüssigkeit zu kondensieren, möge man ihn auch einem noch so starken Druck aussetzen. Ist z. B. Wasserdampf auf mehr als 370° erhitzt, so genügt kein von uns noch hervorzubringender Druck, um ihn in Wasser zu verwandeln; bei dieser Temperatur selber aber müssen dazu 195 Atmosphären Druck angewendet werden. Von dieser sogenannten **kritischen Temperatur** an ist die den Molekülen der betreffenden Substanz innewohnende Wärmekraft, wenn wir hiermit die Energie der molekularen Bewegungen bezeichnen dürfen, unter allen Umständen größer als die auf dieselben konstant wirkenden Molekularkräfte, die wir mit der Schwerkraft zu identifizieren versuchten. Der dieser kritischen Temperatur zugehörige Druck heißt seinerseits der **kritische Druck**.

Die kritische Temperatur ist für die einzelnen Stoffe sehr verschieden, da die Wärmeerscheinungen von der Größe und Zusammensetzung der Moleküle abhängen. Bei den früher sogenannten permanenten Gasen ist die den Molekularkräften entgegengesetzte Spannkraft so groß, daß erst abnorm tiefe Temperaturen hinreichen, um sie bis zur Möglichkeit einer ersten Kondensation abzuschwächen. Die kritische Temperatur des Sauerstoffs liegt bei —113°, und selbst bei dieser niedrigen Temperatur muß man ihn einem Druck von 50 Atmosphären aussetzen, um seine Verflüssigung zu erreichen. Bei gewöhnlichem Atmosphärendruck reicht erst eine Abkühlung auf —181° dazu hin; dies ist also der normale Siedepunkt des Sauerstoffs. Die kritische Temperatur des Wasserstoffs liegt sogar bei 234°; eine Temperatur, bei der derselbe unter normalem Drucke flüssig wird, ist noch nicht erzeugt worden. Sie wird zweifellos dem absoluten Nullpunkte sehr nahe liegen.

Die dargestellten Umstände erklären, daß es bis vor verhältnismäßig kurzer Zeit nicht gelang, eine Reihe von Gasen in den flüssigen Aggregatzustand zu versetzen, solange man eben nur mit sehr hohen Drucken und nicht auch zugleich mit sehr niedrigen Temperaturen operierte. Wie es gelang, diese niedrigen Temperaturen zu erzeugen, ist für uns auch von theoretischem Interesse. Wir müssen zu dem Zwecke die Vorgänge beim Sieden einer Flüssigkeit noch etwas näher beobachten. Setzen wir Wasser einer gleichmäßig fließenden Wärmequelle, einer regulierten Feuerung aus, so wissen wir, daß auch seine Temperatur regelmäßig steigt. Dies hört aber von dem Augenblick an auf, in welchem der Thermometerstand den Siedepunkt erreicht hat. Zunächst wird uns dies nicht verwundern, weil Wasser als solches unter dem betreffenden Druck überhaupt nicht über den Siedepunkt erhitzt werden kann (abgesehen von der vorerwähnten Abnormität der Überhitzung); es geht eben nun in Dampf über. Aber auch, wenn wir das Thermometer nur mit dem entweichenden Dampf in Berührung bringen, steigt es nicht, während doch fortwährend durch das unterhaltene Feuer weitere Wärmemengen dem Wasser wie dem Dampfe zugeführt werden. Erst wenn alles Wasser verdampft ist, erhöht sich wieder der Thermometerstand. Haben wir z. B. gefunden, daß eine Wärmequelle einem Liter Wasser in einer Minute 10,000 Kalorien hinzufügt, also auf 1 g 10 cal., so zeigt es sich, daß es etwa 54 Minuten dauert, bis nach der Erreichung des Siedepunktes alles Wasser verdampft ist, während welcher Zeit also das Thermometer immer nur dieselben 100° anzeigt, obgleich doch

dem Wasser inzwischen 54×10 Kalorien auf das Gramm zugefügt worden sind. Diese sogenannte Verdampfungswärme, die beim Wasser genauer 537 cal. beträgt, kann nicht verschwunden sein. Sie ist nur, wie man sagt, latent geworden, gebunden, eine Ausdrucksweise, die wir im Licht unserer Anschauung nicht gern verwenden, da eine latente Kraft in Gegensatz zu einer lebendigen, vor unseren Augen bewegenden Kraft gesetzt wird. In Wirklichkeit aber ist doch beim Latentwerden einer Kraft der Bewegungszustand der Materie nur in eine andere Form übergegangen, die wir nicht sehen können und deshalb nur als gebunden, also irgendwie festgehalten annehmen müssen, wie die älteren Anschauungen erklären; ähnlich wie wir die Kraft einer Feder binden können, wenn wir diese anspannen und festhalten.

Beim Verdampfen gehen in der Tat die molekularen Bewegungen in andere Formen über. Die Moleküle werden aus den Banden der gegenseitigen Anziehung befreit; ihre Bahnen nehmen bei der Ausdehnung auf die Gasform wesentlich größere Dimensionen an. Sollen sie nun aber in diesen größeren Bahnen die gleiche Geschwindigkeit, d. h. den gleichen Temperaturgrad beibehalten, so muß ihnen Kraft oder, mit dem Fachausdrucke, kinetische Energie hinzugefügt werden: diese Kraft ist die Verdampfungswärme. Auch sie ist sehr verschieden bei den verschiedenen Stoffen.

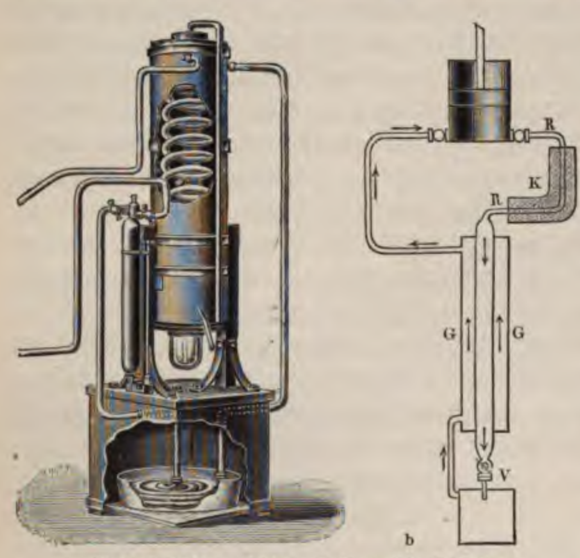
Wir wissen bereits, daß die flüssigen Körper auch schon bei Temperaturen, die weit unter ihrem Siedepunkte liegen, in Dampfform übergehen, daß sie verdunsten. Hierbei gewinnen aber ebenso ihre Moleküle die Möglichkeit, jene größeren Bahnen zu durchlaufen, die ihnen die Dampfform vorschreibt. Die hierzu nötige Kraft können sie nur ihrer Umgebung entnehmen: sie entziehen ihr Wärme. Es entsteht die Verdunstungskälte, die sehr deutlich bei Körpern mit großer Dampfspannung, wie beim Äther, hervortritt. Jedermann weiß, daß Äther oder Alkohol, auf der Hand verdunstet, ein beträchtliches Kältegefühl zurückläßt. Die Verdunstung des Schweißes auf unserer Haut macht uns wegen der dadurch entstehenden Verdunstungskälte große Hitze erträglich. Ist dagegen die Luft bereits mit Feuchtigkeit gesättigt, so kann diese Verdunstung nicht mehr stattfinden, und wir empfinden dann hohe Lufttemperaturen wesentlich drückender. Die Verdunstung des Wassers aus den Meeresbecken und seine Wiederverdichtung in den flüssigen Zustand durch die Veränderungen des Luftdrucks oder der Lufttemperatur verursacht den mächtigen Kreislauf der meteorologischen Erscheinungen, welche ihrerseits einen wesentlichen Einfluß auf die Lebensentfaltung der ganzen organischen Welt unseres Planeten und auf die Gestaltung seiner Oberfläche im Laufe der geologischen Zeitalter ausübt.

Nicht nur beim Verdampfen oder Verdunsten binden die Körper Wärme, indem sie sich freiwillig ausdehnen, sondern auch wenn dies künstlich geschieht, und umgekehrt machen sie Wärme frei beim Zusammendrücken. Radfahrer werden es schon oft wahrgenommen haben, daß beim Einpumpen von Luft ihre Pumpe warm wird, was von der zusammengepreßten Luft herrührt. Auf dieselbe Weise erklärt sich die Wärmeerzeugung durch Stoß oder durch Reibung bei festen Körpern. Den gestoßenen oder geriebenen Molekülen derselben wird künstlich eine größere Geschwindigkeit erteilt, die eben gleichbedeutend mit Temperaturerhöhung ist. Hierbei verwandeln wir also Arbeit in Wärme.

Wenn wir nun ein Gas, das zunächst die Temperatur der Umgebung hat, zusammenpressen, ihm dann die Möglichkeit geben, die Wärmezunahme wieder an die Umgebung abzugeben, und es sich nun erst wieder ausdehnen lassen, so muß es offenbar ebensoviel Wärme verlieren, als es vorher durch den erhöhten Druck erzeugt hatte, also um ebensoviel kälter werden wie die Umgebung. Auf diesem Prinzip beruhen die Kälteerzeugungsmaschinen. Die vollkommenste derselben ist die von Linde, welche die Flüssigmachung der

atmosphärischen Luft sogar schon unter normalem Druck gestattet. Wir können hier ihre sinnreiche Konstruktion nur andeuten (s. die untenstehende Abbildung).

Zunächst wird die Luft auf etwa 50 Atmosphären zusammengedrückt und ihr die dadurch erzeugte Wärme durch ein Kühlgefäß K wieder entzogen, in welchem die die zusammengedrückte Luft führende Röhre R von Eis oder einer sogenannten Kältemischung, von der wir noch später zu reden haben, umgeben ist. Hat nun die Druckluft die Temperatur des Kühlgefäßes angenommen, so gestattet man ihr durch Öffnen eines Ventils V eine plötzliche Ausdehnung, wodurch sie sich wesentlich unter jene Temperatur des Kühlgefäßes abkühlt. Diese kalte Luft wird nun so zurückgeleitet, daß sie das Druckluftrohr im Gegenstromapparat G umgibt und die in diesem enthaltene Druckluft wesentlich mehr abkühlt, als es das Kühlgefäß vermochte. Wird dann diese Luft abermals freigelassen, so kühlt sie sich ihrerseits wieder ab wie der vorher durch den Gegenstromapparat fließende Luftstrom. Die Druckluft wird abermals abgekühlt, und dies geht so fort, bis die betreffende Kondensationstemperatur erreicht ist, die bei atmosphärischer Luft bei —191° liegt. Dann spritzt beim letzten Freilassen die Luft als bläuliche Flüssigkeit in das Auffanggefäß, aus dem man sie, da der Druck hier ein normaler ist, wie Wasser in ein beliebiges Gefäß laufen lassen kann.



Lindes Kältemaschine. b schematische Darstellung.
Nach R. Blochmann, „Licht und Wärme".

Luft besteht bekanntlich im wesentlichen aus einem Gemisch von Sauerstoff und Stickstoff. Nun siedet der letztere bei —193°, der Sauerstoff aber schon bei —181°. Ist die flüssige Luft auf etwa —200° abgekühlt gewesen, so wird bei ihrer allmählichen Erwärmung durch die umgebende Lufttemperatur zuerst der Stickstoff zu sieden beginnen; die flüssige Luft wird also immer sauerstoffreicher werden, und schließlich kann man es dahin bringen, daß nur flüssiger Sauerstoff übrigbleibt. Wegen der verschiedenen Höhe des Siedepunktes bei Anwendung tiefer Kältegrade kann man auf diese Weise Gemische von Substanzen leicht voneinander trennen, was sonst in vielen Fällen nur sehr schwer gelingt. Ein späteres Kapitel wird zeigen, daß prinzipiell das Gleiche auch bei jenen Gemischen der chemischen Grundstoffe stattfindet, die innerhalb atomistischer Dimensionen vor sich gehen, den chemischen Verbindungen. Man kann Dissoziationen derselben vornehmen, indem man sie verschiedenen Temperaturgraden aussetzt.

Die ersten erfolgreichen Versuche, die sogenannten permanenten Gase zu Flüssigkeiten zu verdichten, wurden im Jahre 1877 ziemlich gleichzeitig von Cailletet in Paris und Raoul Pictet in Genf auf sehr verschiedenem Weg ausgeführt. Cailletet benutzte dazu dieselbe Eigenschaft der Gase, sich bei Ausdehnung stark abzukühlen, die später Linde in der vorhin beschriebenen Weise viel vollkommener verwendete. Der Pariser Physiker komprimierte Luft durch eine mächtige Druckschraube (in unserer Abbildung, S. 175, mit M bezeichnet) bis auf etwa

300 Atmosphären. Da dies bei gewöhnlicher Temperatur stattfand, so konnte sich die Luft trotz dieses ungeheueren Druckes nicht verflüssigen. Nachdem sich nun diese stark verdichtete Luft auf die Temperatur der Umgebung abgekühlt hatte, ließ man sie sich plötzlich wieder ausdehnen (durch schnelles Loslassen der Schraube m); dabei setzten sich an den Wänden der betreffenden Glasröhre s Tropfen flüssiger Luft, ja sogar einige feste Kristalle an. Dies war kristallisierte, fest gewordene Luft. Die plötzliche Ausdehnung erzeugte also eine so große Kälte, daß ein Teil der Luft, welcher der Ausdehnung nicht gleich nachgeben konnte, dadurch selbst in den festen Zustand gezwungen wurde. Allerdings konnten auf diese Weise immer nur sehr geringe Mengen verdichtet werden, die sehr bald wieder in den luftförmigen Zustand übergingen, so daß weitere Experimente damit nicht anzustellen waren.



Cailletets Apparat zur Verdichtung permanenter Gase. Vgl. Text, S. 174.

Der Apparat von Pictet ist wesentlich komplizierter als der von Cailletet, erlaubt aber bereits größere Mengen flüssigen Sauerstoff herzustellen und ist in vereinfachterer Form als Eismaschine in sehr verbreitetem Gebrauch gewesen, bis die oben beschriebene Kältemaschine von Linde die Pictetsche verdrängte. Letztere beruht ähnlich wie die Lindesche Maschine auf einem Kreisprozeß, der fortdauernd weiter geführt wird. Man verdichtet schweflige Säure und erreicht durch deren Wiederausdehnung zunächst eine Kälte von etwa —70°. Diese wird benutzt, um komprimierte Kohlensäure abzukühlen, deren Ausdehnung dann schon etwa —130° entwickelt. Setzt man nun ebenfalls stark verdichteten Sauerstoff, den man auf chemischem Wege bereitet hat, dieser Kälte aus, so verflüssigt er sich. Durch Anwendung von Wasserstoff kann man eventuell noch eine Stufe tiefer kommen. Wir erkennen, wieviel einfacher die Erzeugung von Kälte wie flüssigen Sauerstoffs direkt aus der atmosphärischen Luft durch die Lindesche Maschine ist.

Bei diesen Kältemaschinen wird von einem Gas Arbeit auf Kosten der Wärme geleistet. Man könnte sie deshalb umgekehrte Dampfmaschinen nennen. Bei der Dampfmaschine, deren Erfinder der Engländer James Watt war (s. die Abbildung, S. 176), wird in einem Kessel Wasser zum Sieden gebracht. Der Dampf kann nur durch ein Rohr, das abwechselnd durch ein Ventil geöffnet und wieder geschlossen wird, in einen Zylinder entweichen, in welchem ein Stempel luftdicht verschiebbar ist. Die Ausdehnung des Dampfes, die Dampfspannung, treibt den Stempel in die Höhe. Der Zylinder hat auch ein gleichfalls abschließbares Dampfausflußrohr,

bei dessen Öffnung und gleichzeitigem Schluß des Zuflußrohrs durch einen Druck auf den Stempel der Dampf in einen Behälter geführt wird, der eine wesentlich niedere Temperatur besitzt wie die des Kessels. Hier in dem Kondensator wird ein entsprechender Teil der Verdampfungswärme entführt; Dampf verwandelt sich wieder in Wasser, und der Stempel wird durch diese Verdichtung nun noch weiter nach unten gezogen, als es durch den äußeren Druck geschah, der den Verdichtungsprozeß einleitete. Durch Öffnen und Schließen der Ein- und Ausflußhähne wird dieser Prozeß beliebig wiederholt, und auch das kondensierte Wasser gelangt durch eine Pumpe wieder in den Kessel, um sich abermals verdampfen zu lassen, so daß ein vollkommener Kreislauf entsteht. Verbindet man mit dem Stempel eine bewegliche Stange, so kann diese an einer Kurbel ein Rad durch das Auf- und Niedersteigen des Stempels drehen. Diesem wird zur praktischen Verwertung die Eigenschaft eines Schwungrades gegeben, dessen Trägheitsmoment (s. S. 91) man benutzen kann, um das Niederdrücken des Stempels zum Zwecke der Überführung des Dampfes in den Kondensator zu regeln und eine gleichmäßige Arbeit der Maschine zu ermöglichen. Das Öffnen und Schließen der Ab- und Zuführung des Dampfes wurde bei den ersten Dampfmaschinen noch mit der Hand besorgt; es ist aber leicht ersichtlich, daß geeignete Konstruktionen zu finden sind, welche dies durch die eigene Kraft der Maschine besorgen lassen, ebenso wie die Bewegung der Wasserpumpe, so daß die Maschine nach der Anheizung vollkommen selbsttätig arbeitet. Wir haben auch gesehen, wie man in dem Zentrifugalpendel (S. 90) eine Vorrichtung besitzt, die wiederum durch die Maschine selbst die Dampfzuführung auf ein beliebiges Maß einschränkt, beziehungsweise auf diesem erhält, so daß die Maschine ohne weitere Beaufsichtigung eine bestimmte Tourenzahl ihres Schwungrades innehält, wenn man nur für genügende Wärmezufuhr sorgt. Sicherheitsventile schützen vor der Gefahr allzu großen



James Watt. Nach Werckmeister, „Das 19. Jahrhundert in Bildnissen“.

Dampfdruckes. Das sind Öffnungen, die man durch einen Deckel geschlossen hält, welchen man so weit belastet, daß er nur einem gefährlich werdenden Dampfdrucke nachgibt und dadurch eine entsprechende Menge Dampf entweichen läßt. Heute sind die ursprünglich sehr einfachen Apparate zu größter Präzision und Vervollkommnung gebracht worden. Eine derartige Maschine ist auf S. 92 abgebildet.

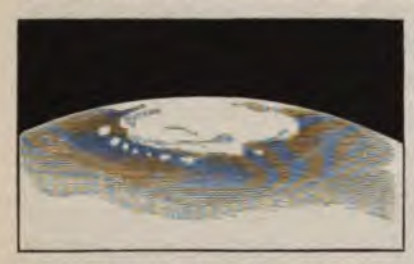
Nach dem Vorangegangenen ist es klar, daß sich die Kraft einer Dampfmaschine nach der Differenz der Wärmemengen berechnet, die im Kessel als Verdampfungswärme aufgenommen und im Kondensator bei der Verdichtung zu Wasser wieder abgegeben werden. Wenn man freilich die auf diese Weise in Kalorien anzugebende Wärmemenge mit Hilfe des vorhin von uns gefundenen Äquivalents der Wärme in Arbeitsleistung übersetzt, so wird man finden, daß die wirkliche Leistung der Maschine weit hinter diesem theoretischen Werte zurückbleibt. Durch Wärmeverluste an die Umgebung, durch Reibungen und Hemmungen verschiedenster Art, durch die Notwendigkeit, eine ganze Anzahl von Maschinenteilen zu bewegen, die den geschilderten Kreisprozeß selbsttätig im Gange erhalten, geht sehr viel der ursprünglich dem Kessel zugeführten Wärme verloren, und man ist zufrieden, wenn man von dem theoretisch gefundenen Werte 5—10 Prozent als wirkliche Arbeitsleistung von einer Maschine erhält.

Haben wir vorhin gesehen, daß es für jeden gasförmigen Stoff bei jedem gegebenen Druck eine kritische Temperatur gibt, bei der er sich verflüssigt, also ziemlich plötzlich seinen inneren molekularen Zustand ändert, so wissen wir, daß auch für die flüssigen Stoffe eine tiefer liegende Temperatur existiert, bei der abermals eine plötzliche Zustandsänderung eintritt, der **Übergang in den festen Zustand**. Bei einer allmählichen Erniedrigung der Temperatur von einer gewissen Höhe an erfahren die Stoffe im allgemeinen auch gleichmäßige Veränderungen ihres inneren Zustandes, dagegen gibt es zwei bestimmte Temperaturgrade für jeden Körper, bei welchen eine plötzliche Zustandsänderung eintritt. Dies ist gewiß sehr merkwürdig und in seinen tieferen Ursachen keineswegs aufgeklärt. Begriffen wir zwar, daß bei einer bestimmten Herabminderung der molekularen Geschwindigkeit, d. h. der Temperatur, die Anziehungskraft der Moleküle aufeinander die Oberhand gewinnen mußte, so daß sie, schnell fortschreitend, sich in den voneinander abhängigen Zustand einer Flüssigkeit zwangen, so bleibt es doch schwer verständlich, weshalb diese einmal begonnene Annäherung nicht weiter geht, sondern die Temperatur dem Verdichtungsprozesse neue Schranken auflegt und ihn von sich abhängig macht, wenn auch nicht mehr in gleichem Maße wie beim gasförmigen Zustand. Auch die Flüssigkeiten dehnen sich mit der Temperatur aus, aber ihre Ausdehnungskoeffizienten, ihre spezifischen Wärmen ꝛc. sind andere, als man sie bei denselben Körpern im gasförmigen Zustande fand. Die Moleküle befinden sich also immer noch in ziemlich weiten Abständen voneinander, da sie immer noch mehr oder weniger freie Wärmebewegungen ausführen. Sie kommen einander durch weitere Temperaturerniedrigung näher und näher, und endlich beginnen sie sich abermals anders zu ordnen, diesmal meist zu den wunderbaren und geheimnisvollen **Kristallformen**. Sie scheinen sich nun fest aneinander gedrängt zu haben. Und doch ist dies wieder nicht so: auch die festen Körper können noch ebenso wie die flüssigen und gasförmigen ihre Temperatur, d. h. die inneren Bewegungszustände ihrer kleinsten Teile, ändern und ziehen sich auch ihrerseits noch ebenso bei Temperaturerniedrigung zusammen. Doch gibt es gewisse Ausnahmen, auf die wir zurückkommen. In diesem dritten Aggregatzustande besitzt ein und derselbe Körper ein ganz anderes Wärmeaufnahmevermögen als in den beiden anderen Zuständen, und zwar ändert sich dieses nicht einmal immer im sinngemäßen Fortschritt mit den sich ändernden Aggregatzuständen. So ist die spezifische Wärme des Eises

0,48, die des Wassers bekanntlich 1,00, die des Wasserdampfes dagegen 0,37; sie ist demnach für den mittleren Aggregatzustand am größten.

Da wir sahen, daß in allen drei Zuständen der Widerstreit der Wärmewirkung mit der molekularen Anziehungskraft bestehen bleibt, so dürfen wir von vornherein vermuten, daß beim Schmelzen der Körper ganz ähnliche feste Regeln zutage treten wie beim Sieden.

Tatsächlich gibt es zunächst eine Schmelzwärme, wie es eine Verdampfungswärme gibt. Eis kann eine beliebige Temperatur unter Null haben. Fügt man ihm nun Wärme zu, so dehnt es sich entsprechend seiner Wärmekapazität aus, und die Thermometerangaben steigen im gleichen Verhältnis. Sobald diese aber 0° erreicht haben, das Eis also zu schmelzen beginnt, bleibt trotz fortgesetzter Wärmezufuhr die Temperatur so lange unverändert, bis alles Eis geschmolzen ist. Wir finden, daß die Schmelzwärme des Wassers gleich 79,25 Kalorien, also wesentlich geringer ist als seine Verdampfungswärme, die gleich 537 Kalorien ist. Die Schmelzwärme des Silbers ist gleich 21, die des Schwefels 9,4 und die des Quecksilbers 2,8 Kalorien. Das letztere verschluckt also nur sehr wenig Wärme beim Schmelzen, es schmilzt sehr leicht.



Pol des Mars mit seinen Schneeflecken. Nach W. Meyer, „Das Weltgebäude". Vgl. Text, S. 179.

Die Schmelzpunkte der Stoffe sind bekanntlich sehr verschieden. Bei einer Anzahl von Stoffen liegt er bei so hohen Temperaturen, daß wir dieselben allein im elektrischen Flammenbogen zu erreichen vermögen, dessen Wärmegrad nur annähernd bestimmt werden kann. Platin schmilzt bei 1775°, Schmiedeeisen bei 1600°, Gold bei 1070°, Blei bei 328°, Schwefel bei 114°, Phosphor bei 44°, Quecksilber bei —39°, Kohlensäure bei —57°, Stickstoff bei —203°. Wir sehen auch, daß die Entfernung des Schmelzpunktes vom Siedepunkte bei den verschiedenen Stoffen sehr verschieden ist. Bei dem eben erwähnten Stickstoff liegen diese beiden Punkte nur um 10° auseinander, da dieser schon bei —193° siedet; Stickstoff kann also nur in sehr engen Temperaturgrenzen flüssig erhalten werden. Beim Quecksilber dagegen liegen die beiden Punkte um beinahe 400° auseinander: Quecksilber ist ein vorwiegend flüssiger Stoff. Der Siedepunkt des Schwefels liegt bei 448°; das ist 334° höher als sein weiter oben angegebener Schmelzpunkt. Da die spezifische Wärme des Schwefels 0,176 ist, so gebraucht derselbe etwa 58 Kalorien, um vom Schmelzen zum Sieden gebracht zu werden, während das Wasser bekanntlich 100 dazu nötig hat. Man kann sich einen Weltkörper denken, dessen Oberflächentemperatur noch einige hundert Grad höher ist als die der Erde. Auf solchem Körper würde dann bei gleicher Wärmezufuhr und überhaupt sonst gleichen astronomischen Verhältnissen der Schwefel dieselbe Rolle spielen können wie das Wasser auf der Erde; er würde flüssige Seebecken bilden, in die Atmosphäre verdampfen, flüssig oder als fester Schwefelregen daraus wieder niederfallen und überhaupt denselben Kreislauf bilden wie das Wasser. Es ist nicht unmöglich, daß selbst auf unserem Planeten zu jenen Zeiten, als noch kein Leben auf ihm atmete, der Schwefel oder nacheinander noch andere Elemente diese Rolle gespielt haben und dabei jene archäischen Urgesteine erzeugten, die einerseits einen vulkanischen Charakter zeigen, und wohl in feurigem Fluß gewesen sind, während sie doch gleichzeitig Spuren von Schichtungen aufweisen, wie sie das Wasser in seinem Kreislauf später als Sedimentgesteine hervorbrachte. Diese Urgesteine sind auch deutlich kristallinisch. Sie müssen sich in verhältnismäßig ruhigem Zustande, wie Eis auf dem Wasser, gebildet haben.

Kohlensäure schmilzt bei —57° und siedet bei —78°. In einer Welt, die sich bereits mehr abgekühlt hat als die unsrige, oder die von ihrer Sonne weniger Wärme zugestrahlt erhält, kann die Kohlensäure die Rolle des Wassers vertreten, und es gibt Forscher, die der Ansicht sind, daß die mit den Jahreszeiten zusammenhängenden Erscheinungen, welche wir auf dem Planeten Mars wahrnehmen (s. die Abbildung, S. 178), nicht dem Kreislauf des Wassers wie bei uns, sondern dem der Kohlensäure zuzuschreiben seien.

Da beim Schmelzen ebenso wie beim Sieden offenbar der Widerstreit zwischen der Wärme und den Anziehungskräften unter den Molekülen eine wesentliche Rolle spielt, so beeinflußt der Druck, welcher auf der betreffenden Substanz lastet, ebenso den Schmelzpunkt wie den Siedepunkt, wenn auch dieser Einfluß sich als sehr gering herausstellt. Beim Wasser wird der Schmelzpunkt für jeden hinzukommenden Atmosphärendruck um 0,0075° erniedrigt. Die inneren molekularen Anziehungskräfte um den Schmelzpunkt herum sind folglich bereits zu groß, als daß ein äußerer Druck noch einen wesentlichen Einfluß auf die Bewegungsverhältnisse der Moleküle ausüben könnte, wie es in der Nähe des Siedepunkts noch der Fall ist. Praktisch kann man die Veränderlichkeit des Schmelzpunktes mit der des Barometerstandes vernachlässigen, was bei der Bestimmung des Siedepunktes nicht möglich ist.



Regelationsversuch an einem durch einen Draht zerschnittenen Eisblock.

Im Haushalte der Natur tritt indes diese Schmelzpunktserniedrigung in sehr wichtigen Beziehungen hervor. Die Tiefseeforschungen, die in neuerer Zeit mit so großem Eifer und Erfolge betrieben werden, haben erwiesen, daß auf dem Meeresgrund eine sehr niedrige Wassertemperatur herrscht, die in größeren Tiefen oft bis zu 2 und 3° unter dem Gefrierpunkt liegt. Wenn nun zwar das Meerwasser wegen seines Salzgehaltes auch an der Oberfläche unter 0° abgekühlt werden muß, ehe es gefriert, so kann sich doch das Wasser in den Meerestiefen sicher nur unter dem Einflusse des gewaltigen Druckes und der damit verbundenen Schmelzpunktserniedrigung flüssig erhalten. Der Wasserdruck nimmt, wie wir wissen (S. 111), mit je 10 m ungefähr eine Atmosphäre zu. Danach berechnet sich der Gefrierpunkt des Wassers in einer Tiefe von 3000 m zu —2,25°, bei 5000 m zu —3,75° und bei 8000 m zu —6,0°. Das Wasser bleibt infolgedessen auch in den Meerestiefen flüssig und kann seine ausgleichende Tätigkeit ausüben, die ein Hauptfaktor für alle meteorologischen Verhältnisse ist, unter denen wir leben.

Der auf Eis wirkende Druck schmilzt dieses an der betreffenden Stelle wegen der hier eintretenden Schmelzpunktserniedrigung; aber das Wasser gefriert sofort wieder, wenn der Druck aufhört. Der Versuch wird gewöhnlich so gemacht, daß man einen Draht über einen Eisblock spannt, der durch den vom Draht ausgeübten Druck zunächst zerschnitten wird (s. die obenstehende Abbildung). Da über dem Draht das Wasser wieder gefriert, weil hier kein Überdruck vorhanden ist, so wandert der Draht in Wirklichkeit mitten durch den Eisblock hindurch, ohne daß

nachher eine Spur davon zu bemerken ist. Durch diese Erscheinung der Regelation erklärt sich das Fließen der Gletscher. Die durch ihren eigenen Druck auf den unebenen Talsenkungen vorgeschobenen Eismassen brechen an abschüssigen Stellen ab und würden nun wilde Trümmerhaufen bilden, wenn die einzelnen Blöcke nicht unter dem Einfluß der Regelation wieder zusammengefügt würden, wodurch der Gletscher zu einem zusammenhängenden, gleichmäßig fließenden Eisstrome wird.

Im Zusammenhange mit jenem Widerspiel der molekularen Anziehungskraft und der Wärme steht auch die Wahrnehmung, daß bei normalem Drucke die Dichtigkeit des Wassers nicht bis zum Gefrierpunkte gleichmäßig abnimmt, sondern ihr Maximum bei $+4^{0}$ hat. Obgleich also die kleinsten Teile des Wassers sich beim Gefrieren fester zusammenfügen müssen, da sie nun ihre Verschiebbarkeit gegeneinander verlieren und sich zu harten Kristallen verbinden, liegen sie durchschnittlich im Eise doch weiter voneinander entfernt als im flüssigen Zustande bei einer Temperatur von 4^{0}. Von unserem gegenwärtigen Standpunkt aus sind wir noch nicht in der Lage, eine genügende Erklärung für diese Erscheinung zu geben. Wir können nur vermuten, daß beim Festwerden der Stoffe die Bahnen der Moleküle sich anders ordnen, wodurch sie in feste Lagebeziehungen zueinander treten, ohne deshalb ihre mittleren Entfernungen verkleinern zu müssen. Bei unseren Betrachtungen der chemischen Vorgänge kommen wir auf diese Erscheinungen zurück.

Bei den kosmischen Bewegungen, mit denen wir die molekularen bereits so oft verglichen haben, können entsprechende Neuordnungen der Glieder zweier Systeme sich als theoretische Notwendigkeiten ergeben. Man denke sich zwei von Planeten umkreiste Sonnen, die sich zunächst nicht infolge ihrer gegenseitigen Anziehungen, sondern vermöge ihrer Eigenbewegung — die ja in molekularen Verhältnissen nichts anderes als die Wärmebewegung ist — einander nähern. Sobald nun dabei die Bahnumfänge der äußersten Planeten beider Systeme sich nahe zu berühren beginnen, werden auch die Planeten selbst einander stark beeinflussen und, sowie sie in dem Konjunktionspunkte zusammentreffen, ein fest verbundenes System bilden, noch weit bevor die Sonnen selbst eine so große Anziehungskraft aufeinander üben, daß sie sich dadurch zu einem Doppelsternsystem verbinden müßten. Dadurch aber, daß sich jene Planeten vereinigen, kann, wenn diese mächtig genug sind, eine sehr wesentliche Schwerpunktsverschiebung der beiden Sonnensysteme eintreten, welche nun ihre dauernde Vereinigung bewirkt. Wenn die beiden Sonnen Bahnen umeinander beschreiben, so braucht ihr mittlerer Abstand nicht kleiner zu werden, als er im Augenblicke des Zusammentreffens ihrer beiden Planeten war, das den Anstoß zu der Vereinigung gab. Ja, eine Vergrößerung des ganzen Umfanges der beiden Sonnensystemgebiete ist sogar eine theoretische Notwendigkeit, denn durch Störungen der beschriebenen Art entstehen immer große Bahnexzentrizitäten, welche die Körper in langgestreckten Ellipsen, wie bei den periodischen Kometen, über die Bahnumfänge der Kreisläufe ungestörter Planeten weit hinausführen. Wollen wir zur Veranschaulichung der unsichtbar kleinen molekularen Vorgänge unsere kosmischen Vergleiche noch weiter führen, so sehen wir also die scheinbar nur von ihrer Eigenbewegung durch den Raum getriebenen planetenlosen Sonnen wie die Atome gasförmiger Stoffe an. Haben sie Planeten um sich versammelt, die sie umkreisen, so werden sie zu Molekülen. Vereinigen sich viele solcher Sonnen durch die eigene innere Anziehungskraft ihrer Materie zu einem kugelförmigen Sternhaufen, so haben wir das kosmische Bild eines Tropfens Flüssigkeit vor uns, und sobald sich zwei oder mehr Sonnensysteme zu Doppel- oder mehrfachen Sternen zusammenschließen, haben wir einen kosmischen Kristallisationsprozeß.



Das Gletschertor am Rhonegletscher.

Nach der Natur von *E. Heyn.*

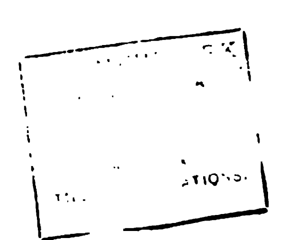
nachher eine Spur davon zu bemerken ist. Durch diese Erscheinung der **Regelation** erklärt sich das **Fließen der Gletscher**. Die durch ihren eigenen Druck auf den unebenen Talsenkungen vorgeschobenen Eismassen brechen an abschüssigen Stellen ab und würden nun wilde Trümmerhaufen bilden, wenn die einzelnen Blöcke nicht unter dem Einfluß der Regelation wieder zusammengefügt würden, wodurch der Gletscher zu einem zusammenhängenden, gleichmäßig fließenden Eisstrome wird.

Im Zusammenhange mit jenem Widerspiel der molekularen Anziehungskraft und der Wärme steht auch die Wahrnehmung, daß bei normalem Drucke die Dichtigkeit des Wassers nicht bis zum Gefrierpunkte gleichmäßig abnimmt, sondern ihr Maximum bei + 4° hat. Obgleich alle die kleinsten Teile des Wassers sich beim Gefrieren fester zusammenfügen müssen, da sie nun ihre Verschiebbarkeit gegeneinander verlieren und sich zu harten Kristallen verbinden, liegen sie durchschnittlich im Eise doch weiter voneinander entfernt als im flüssigen Zustande bei einer Temperatur von 4°. Von unserem gegenwärtigen Standpunkt aus sind wir noch nicht in der Lage, eine genügende Erklärung für diese Erscheinung zu geben. Wir können nur vermuten, daß beim Festwerden der Stoffe die Bahnen der Moleküle sich anders ordnen, wodurch sie in feste Lagebeziehungen zueinander treten, ohne deshalb ihre mittleren Entfernungen verkleinern zu müssen. Bei unseren Betrachtungen der chemischen Vorgänge kommen wir auf diese Erscheinungen zurück.

Bei den kosmischen Bewegungen, mit denen wir die molekularen bereits so oft verglichen haben, können entsprechende Neuordnungen der Glieder zweier Systeme sich als theoretische Notwendigkeiten ergeben. Man denke sich zwei von Planeten umkreiste Sonnen, die sich zunächst nicht infolge ihrer gegenseitigen Anziehungen, sondern vermöge ihrer Eigenbewegung — die ja in molekularen Verhältnissen nichts anderes als die Wärmebewegung ist — einander nähern. Sobald nun dabei die Bahnumfänge der äußersten Planeten beider Systeme sich nahe zu berühren beginnen, werden auch die Planeten selbst einander stark beeinflussen und, sowie sie in dem Konjunktionspunkte zusammentreffen, ein fest verbundenes System bilden, noch weit bevor die Sonnen selbst eine so große Anziehungskraft aufeinander üben, daß sie sich dadurch zu einem Doppelsternsystem verbinden müßten. Dadurch aber, daß sich jene Planeten vereinigen, kann, wenn diese mächtig genug sind, eine sehr wesentliche Schwerpunktsverschiebung der beiden Sonnensysteme eintreten, welche nun ihre dauernde Vereinigung bewirkt. Wenn die beiden Sonnen Bahnen umeinander beschreiben, so braucht ihr mittlerer Abstand nicht kleiner zu werden, als er im Augenblicke des Zusammentreffens ihrer beiden Planeten war, das den Anstoß zu der Vereinigung gab. Ja, eine Vergrößerung des ganzen Umfanges der beiden Sonnensystemgebiete ist sogar eine theoretische Notwendigkeit, denn durch Störungen der beschriebenen Art entstehen immer große Bahnexzentrizitäten, welche die Körper in langgestreckten Ellipsen, wie bei den periodischen Kometen, über die Bahnumfänge der Kreisläufe ungestörter Planeten weit hinausführen. Wollen wir zur Veranschaulichung der unsichtbar kleinen molekularen Vorgänge unsere kosmischen Vergleiche noch weiter führen, so sehen wir also die scheinbar nur von ihrer Eigenbewegung durch den Raum getriebenen planetenlosen Sonnen wie die Atome gasförmiger Stoffe an. Haben sie Planeten um sich versammelt, die sie umkreisen, so werden sie zu Molekülen. Vereinigen sich viele solcher Sonnen durch die eigene innere Anziehungskraft ihrer Materie zu einem kugelförmigen Sternhaufen, so haben wir das kosmische Bild eines Tropfens Flüssigkeit vor uns, und sobald sich zwei oder mehr Sonnensysteme zu Doppel- oder mehrfachen Sternen zusammenschließen, haben wir einen kosmischen Kristallisationsprozeß



Das Gletschertor am Rhonegletscher.
Nach der Natur von *E. Heyn.*



Daß das Wasser sein Dichtigkeitsmaximum bei einer Temperatur über dem Gefrierpunkte hat, ist für den Haushalt der irdischen Natur von unermeßlicher Wichtigkeit. Wäre Eis schwerer als Wasser, so müßte es in demselben untersinken und also die Seen und Meere von untenher ausfüllen, während in Wirklichkeit das auf der Oberfläche schwimmende Eis die darunter befindlichen Wasserschichten vor tieferem Eindringen der Kälte schützt. Jedes Gramm Eis verschluckt beim Schmelzen 80 Kalorien. Es wäre also, wenn im Winter die Seen und Flüsse bis zum Grunde zufrören, im Frühjahr eine sehr viel größere Wärmearbeit zum Auftauen nötig, die den anderen Betätigungen der Leben erhaltenden Naturkraft verloren gingen. Zu dem Eis in den tieferen Meeresgründen könnte die Wärme überhaupt nicht dringen, da die Zirkulation des Oberflächenwassers das wärmere und somit leichtere Wasser gar nicht dorthin gelangen läßt. Die Meere müßten sich also unausgesetzt weiter mit Eis ausfüllen, bis an ihrer Stelle eine starre Gesteinsmasse die Erdoberfläche bedeckte, die nur während des Sommers obenauf ein wenig schmelzen würde. Der Kreislauf des Wassers, der unsere Naturentfaltung überhaupt nur möglich macht, würde bald fast ganz aufhören und Todesstarre rings um unseren schönen Planeten herrschen. Nun sind keineswegs die Kristalle aller Stoffe leichter als die Lösungen, aus denen sie sich niederschlagen. Stoffe, die kristallisiert schwerer sind als geschmolzen, können auf keinem Weltkörper und zu keinen Zeiten die Rolle des Wassers in der Lebensentfaltung auf denselben gespielt haben.

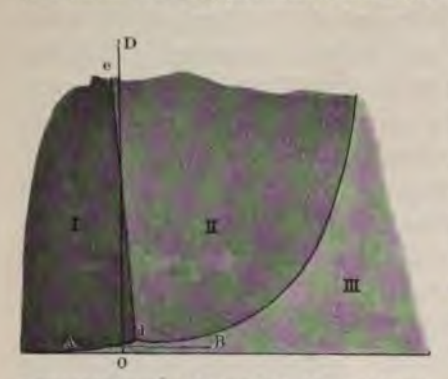

Durch Eis gesprengte Bombe. Nach „Annalen der Physik", 1879.

Wenn die Ausdehnung des Wassers schon bei +4° beginnt und nicht erst beim sichtbaren Gefrieren selbst, so hat dies wohl seinen Grund darin, daß in diesem kalten Wasser sich bereits Eiskristalle bilden, die nur zu klein sind, um gesehen werden zu können, ebenso wie ja auch eine Verdampfung des Wassers schon weit unter dem Siedepunkte stattfindet.

Die Schmelzpunktserniedrigung bei höherem Druck in Verbindung mit der Wiederausdehnung beim Gefrieren kann dem Wasser unter Umständen eine ganz gewaltige Kraft verleihen. Füllt man z. B. den nur kleinen Hohlraum einer dickwandigen eisernen Bombe mit Wasser an und setzt sie einer Temperatur von etwa —10° aus, so zersprengt diese geringe Menge Wasser die Bombe mit ebenso großer Sicherheit, wie es der furchtbarste Explosivstoff vermag (s. die obenstehende Abbildung). Da das Wasser in der Bombe keinen Platz hat, um sich auszukristallisieren, so kommt es, etwa auf —10° abgekühlt, in dieselbe Lage, als wenn ein Druck auf ihm lastete, der im stande ist, seinen Schmelzpunkt bis zu diesem Grade zu erniedrigen. Der Druck von 1 Atmosphäre bringt nach Seite 179 eine Schmelzpunktserniedrigung von 0,0075° hervor; demnach übt flüssiges Wasser von —7,5° bereits einen Druck von 1000 Atmosphären aus, der die stärksten Bomben zersprengt. Sowie aber dann das Wasser von diesem Drucke befreit ist, gefriert es plötzlich beim Herausspritzen und bildet dabei oft so wunderliche Figuren, wie ein Tropfen Blei, den man in Wasser gießt.

Diese Sprengwirkung des sich ausdehnenden Eises kommt auch im Hochgebirge zur Geltung, wo das Wasser in die Felsspalten rinnt und diese beim Gefrieren erweitert, bis ein Felsblock nach dem anderen abgelöst und ins Tal hinabgestürzt wird.

Das für unsere gesamte Naturentfaltung, wie wir sahen, so wichtige Verhalten des Wassers unter den verschiedenen Druck- und Temperaturverhältnissen wird durch die nebenstehende schematische Kurve veranschaulicht, in welcher die Temperaturen horizontal nach rechts, die Drucke vertikal von unten nach oben zunehmen. Die Druckachse ist als Lot im Nullpunkt O errichtet. Die Gebiete des Eises, I, und des flüssigen Wassers, II, werden durch eine gerade Linie de getrennt, die die Druckachse OD unter einem sehr kleinen Winkel schneidet, der auf der Zeichnung noch wesentlich übertrieben werden mußte. Dies bedeutet, daß der Schmelzpunkt, der immer auf dieser Grenzlinie zwischen I und II liegt, mit erhöhtem Druck nur sehr wenig tiefer wird. Wo diese Grenzlinie die Druckachse schneidet, das Wasser also bei 0° gefriert, ist der Druck gleich 1 Atmosphäre. Oberhalb ist das Wasser noch bei Temperaturen unter 0° flüssig, weil die Grenzlinie links von der Druckachse bleibt. Die Grenzlinie zwischen dem flüssigen Wasser und dem Dampf, die zwischen II und III liegt, ist stark gebogen und verläuft vom Druck über einer Atmosphäre an fast parallel mit der Druckachse, d. h. der Druck nimmt längs dieser **Sättigungskurve**, auf welcher flüssiges Wasser und Dampf im Gleichgewicht sind, mit der Temperatur, entsprechend unserem auf S. 167 entwickelten Gesetz für gesättigte Dämpfe, zu. In d trifft diese Sättigungskurve mit der Grenzlinie des Eises zusammen. Eine durch diesen besonders merkwürdigen Punkt, der einem Druck von 4,57 mm Quecksilber entspricht und viel näher, als hier gezeichnet werden konnte, am Nullpunkt der Temperatur liegt, gezogene horizontale Linie AB stellt eine Zustandsänderung des Eises dar, bei welcher es bei konstantem sehr niedrigen Druck mit einer Temperaturerhöhung direkt in Dampf übergeht, ohne vorher flüssig geworden zu sein, denn die Linie geht ja durch das Gebiet des flüssigen Wassers nicht mehr hindurch. Dieses direkte Verdampfen des Eises, wie überhaupt jeden direkten Übergang vom festen in den gasförmigen Zustand, nennt man **Sublimation**.



Temperaturzustandskurven des Wassers. I. Gebiet des Eises; II. Gebiet des flüssigen Wassers; III. Gebiet des Dampfes.


Cirruswolken (Schäfchen). Vgl. Text, S. 183.

Man hat seinerzeit gegen die Meinung, daß die sogenannten Mareebenen des Mondes mit Eis ausgefüllt seien, angeführt, daß wegen des Mangels einer Atmosphäre dieses Eis sich längst in den Weltraum verflüchtigt, „sublimiert“, haben müsse. Diese Verdunstung würde aber doch eine Atmosphäre erzeugen, deren Druck bald jenen Grenzwert von 4,57 mm erreicht hätte; dann geht bei weiterer Wärmeaufnahme das Eis wie gewöhnlich in Flüssigkeit über und kann später wieder gefrieren.



Das Apenninen-Gebirge auf dem Monde.



Die Fortsetzung der Sättigungskurve von d nach links heißt die Sublimationskurve. Wir sehen, daß sie bei d einen Knick besitzt. Dieser deutet bildlich die Veränderung der molekularen Gruppierungen an, die beim Schmelzen eintreten. Den Punkt d selbst nennt man den dreifachen Punkt des Wassers. In ihm sind Eis, flüssiges Wasser und Dampf im Gleichgewicht. Unter den diesem Punkte zugehörigen Druck- und Temperaturverhältnissen kann sowohl Eis wie flüssiges Wasser und Wasserdampf zugleich und nebeneinander bestehen. Erhöht man den Druck solches Dampfes, so wird er flüssig, erniedrigt man seine Temperatur, so wird er zu Eis, ohne vorher zu verflüssigen. Auf diese Weise entstehen jedenfalls die Eisnadeln, die die Cirruswolken (s. die untere Abbildung, S. 182) in den höchsten Regionen unserer Atmosphäre bilden.

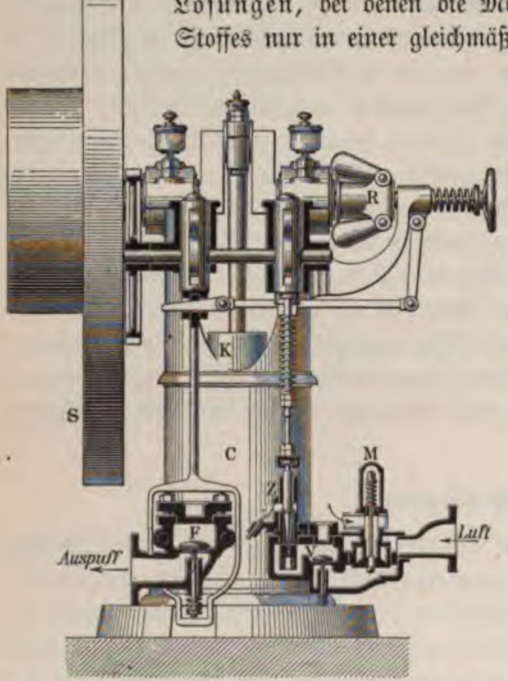
Jeder der drei Aggregatzustände eines Stoffes hat einen sehr verschiedenen Anteil an der Arbeitsleistung in der Natur. Nehmen wir wieder das allgegenwärtige Wasser als Beispiel, so sehen wir, daß es als Eis wohl eine wichtige, aber eine verhältnismäßig wenig ausgedehnte Arbeit leistet. Wieviel größer ist dagegen der Wirkungskreis des flüssigen Wassers! Zu den mechanischen Wirkungen in den Flüssen und am Strande, seiner klimatisch ausgleichenden Zirkulation in den Meeresbecken, tritt nun noch eine umfangreiche chemische Arbeit durch die lösenden Wirkungen des Wassers und seine Verbindungen mit den Gesteinen. Am gewaltigsten aber tritt uns die Arbeit des Wassers in seiner Dampfform in der großen Wärmekraftmaschine der Atmosphäre entgegen. Die Arbeitskraft nimmt hier deutlich mit der größeren Freiheit der molekularen Bewegungen zu. Auch wird die Art der Arbeitsleistung mit dem Aggregatzustande eine wesentlich verschiedene. Die festen Körper und Gase verrichten, zwar in sehr verschiedener Form und Stärke, hauptsächlich durch ihre Ausdehnung mechanische Leistungen, dagegen ist das Flüssige das eigentliche Element der chemischen Vorgänge, die sich innerhalb molekularer Räume abspielen.

f) Wärme und Chemismus.

Zwischen den chemischen Vorgängen und der Wärme bestehen sehr viel Wechselbeziehungen. Man begreift dies leicht, wenn man vorausschickt, daß die chemischen Veränderungen der Stoffe auf Andersordnungen der molekularen Zusammensetzung beruhen, indem eine bestimmte Atomgruppierung, die ein Molekül bildet, mit einer anderen zusammentritt, um durch Austausch von Atomen zwei neue Gruppierungen zu bilden, die nun andere chemische und allgemein physikalische Eigenschaften haben. Im weitesten Sinne könnte man deshalb auch schon den Übergang aus einem in den anderen Aggregatzustand eine chemische Reaktion nennen, da auch hierbei, wie wir sahen, molekulare Umgruppierungen stattfinden müssen, und die sogenannten allotropen Veränderungen, die gewisse chemische Elemente erfahren können, wie Sauerstoff, Schwefel, Phosphor, verdanken wahrscheinlich ganz ähnlichen innermolekularen Vorgängen ihre Entstehung, wie sie nach unserer Ansicht beim Festwerden der Körper eintreten. Aber als eigentliche chemische Vorgänge bezeichnet man nur jene, die beim Zusammentreten zweier verschiedener Stoffe einen dritten Stoff bilden, während man es doch bei dem Übergang zwischen den Aggregatzuständen nur mit ein und demselben Stoffe zu tun hat, der freilich in den drei verschiedenen Zuständen nicht nur physikalisch, sondern auch chemisch ganz verschiedene Eigenschaften annimmt und folglich wohl als ein ganz anderer Körper angesehen werden könnte.

Sollen nun zwei verschiedene Substanzen ihre Moleküle miteinander austauschen, so müssen diese auf jeden Fall miteinander in Berührung kommen. Zwei feste Körper können

deshalb nur schwer in eine chemische Reaktion zueinander treten und meist nur an ihren Berührungsflächen. Ebenso wird die Berührung nur schwer stattfinden, sobald die Moleküle im gasförmigen Zustande zu weite Abstände haben und sich also in ihrer freien Bewegung nur verhältnismäßig selten treffen. In den Flüssigkeiten dagegen befinden sich die Moleküle unter Umständen sogar näher beieinander als in dem festen Zustande desselben Stoffes; trotzdem aber können sie noch frei aneinander vorüberkommen, um sich je nach ihrer chemischen Verwandtschaft aufzusuchen und zu neuen Gruppierungen zu vereinigen. Mit einigen dieser chemischen Vorgänge haben wir uns bereits hier zu beschäftigen, soweit sie in Beziehungen zu den oben entwickelten Prinzipien der Wärmelehre stehen.



Gasmotor. C Zylinder, K Kolben, Z Zünder, M F V Ventile, R Regulator, S Schwungrad. Vgl. Text, S. 185.

Von den eigentlichen chemischen Verbindungen unterscheidet man die Lösungen, bei denen die Moleküle des Lösungsmittels und des gelösten Stoffes nur in einer gleichmäßig verteilten Mischung nebeneinander gelagert sind, ohne daß die innere Zusammensetzung der molekularen Systeme eine Änderung erfährt. Man kann deshalb bei den Lösungen von vornherein voraussetzen, daß sie sich in Bezug auf die Wärmebewegungen verhalten werden, wie es die beiden für sich bestehenden Stoffe tun würden, wenn man ihre Wirkungen addiert. Wenn wir Kochsalz mit Wasser mischen und die Lösung auf eine bestimmte Temperatur erwärmen, so haben dadurch die Moleküle des Salzes sowohl wie die des Wassers ein und dieselbe jenem Temperaturgrad entsprechende Geschwindigkeit angenommen. Nun hat aber das Salz eine andere spezifische Wärme als das Wasser. Es müssen also dem Gemisch entsprechend mehr oder weniger Kalorien hinzugefügt werden, um den durch die Temperatur ausgedrückten Energiewert für die gleichmäßige Bewegung beider Arten von Molekülen zu erhalten. Wir verstehen auch ohne weiteres, daß der Grad, um welchen sich diese Temperaturverhältnisse in den Lösungen ändern, von dem Verhältnis der Anzahl von Molekülen des einen zu der des anderen der beiden zusammentretenden Stoffe, d. h. von der Konzentration der Lösung, abhängen muß. Im nahen Zusammenhange hiermit steht die als Gesetz von Raoult bekannte Tatsache, daß der Gefrierpunkt eines Lösungsmittels stets im Verhältnis der Anzahl von Molekülen, die es auflöst, erniedrigt wird. Deshalb gefriert salzhaltiges Wasser immer erst bei Temperaturen unter Null und zwar um so schwerer, je salziger es ist. Aus ganz demselben Grunde wird anderseits der Siedepunkt der Lösungen im selben Verhältnis erhöht.

Verwickelter werden die Erscheinungen bei den eigentlichen chemischen Verbindungen, die unter sehr verschiedenen Umständen Wärme entwickeln oder eine Arbeit leisten, die man als eine Umsetzung aus einer Wärmebewegung auffassen muß. In allererster Linie gehören hierher die Verbrennungserscheinungen. Bei einer Mischung von 2 g Wasserstoff mit 16 g Sauerstoff



berechnen, wie vielen Kalorien die Arbeitsleistung eines Pferdes gleichkommt, und wieviel Nahrung es deswegen mehr gebraucht, die es zur Heizung der tierischen Wärmemaschine nötig hat, wenn sie die verlangte Arbeitsmenge liefern soll. Arbeit macht Appetit.

Wir sahen vorhin, daß die bei einer chemischen Verbindung erzeugte Wärme mindestens genügen müsse, um diese Verbindung wieder zu lösen, die Elemente zu dissoziieren. Wasserstoff und Sauerstoff, deren Gemisch sich unter der Wärmewirkung des kleinsten Funkens sofort mit ungeheurer Kraft chemisch verbindet, würden doch von einem gewissen, sehr viel höheren Hitzegrade ab, sicher aber bei 6700°, ruhig nebeneinander bleiben, ohne das geringste Bestreben zur Verbindung zu zeigen. Man nennt deshalb jenen Hitzegrad, unter welchem ein chemisches Element sich nicht mehr in eine Verbindung einläßt, seine Dissoziationstemperatur.

Stellen wir uns die chemischen Verbindungen als Gruppierungen von Atomen der verschiedenen Elemente zu besonderen molekularen Weltsystemen vor, deren einzelne Glieder durch ihre eigenen Anziehungskräfte zusammengehalten werden, so begreifen wir wohl, daß eine genügend große Wärmebewegung schließlich auch diese inneren Anziehungskräfte zu überwinden vermag, wie sie die Verbindung der Moleküle einer Flüssigkeit beim Verdampfen lösen konnte. Entsprechend der sehr großen Kraft, mit der nach dem Zeugnis aller chemischen Vorgänge die Atome in ihrem molekularen Aufbau festgehalten werden, muß die Dissoziationstemperatur auch eine sehr hohe und wesentlich höher als die Siedetemperatur sein.

Von der Dissoziationstemperatur unterscheidet sich die Dissoziationswärme, die die Anzahl von Kalorien bemißt, welche einer Verbindung hinzugefügt werden muß, damit sie sich auflöst. Wir sehen also, daß chemische Verbindungen und Zersetzungen nicht nur durch das Zusammenbringen verschiedener Substanzen hervorgerufen werden, worauf wir erst im Kapitel über die chemischen Vorgänge näher eingehen können, sondern auch durch Wärmezuführung oder Wärmeentziehung. Es gibt ganz bestimmte Temperaturgrenzen, in denen eine gewisse Verbindung allein eintreten kann. Auch wenn die Temperatur eine zu niedrige wird, hören die chemischen Reaktionen auf, weil die zu nahe aneinander rückenden Moleküle dann nicht mehr die genügende Bewegungsfreiheit haben. Raoul Pictet, dem wir außer jener Verflüssigung der Gase noch viele andere interessante Untersuchungen über die Einwirkungen der Kälte auf die leblosen Stoffe sowie auf die Organismen verdanken, hatte deshalb eine neue Methode der chemischen Analyse nur durch allmähliche Wärmewirkungen vorgeschlagen. Denn auch der Kältegrad, bei welchem die chemischen Reaktionen erst beginnen, ist bei den verschiedenen Stoffen ein anderer. Eine Mischung solcher Stoffe unter großer Kälte, die dem absoluten Nullpunkt nahekommt, wird bei langsamer Wärmezufuhr jede besondere Verbindung, welche zwischen diesen Stoffen möglich ist, nacheinander eingehen, also eine systematische Synthese vorstellen. Leider ist es zu schwierig, sowohl mit sehr niedrigen, wie auch, für die Trennung der Verbindungen, mit sehr hohen Temperaturen zu arbeiten, als daß diese Methode eine allgemeine Bedeutung erlangen könnte.

Neuere Untersuchungen über die Temperatur der Sonnenoberfläche haben ergeben, daß sie wahrscheinlich zwischen 6000 und 8000° liegt. Solche Hitzegrade übertreffen, nach den Erfahrungen in unseren Laboratorien, die Dissoziationstemperatur der meisten Stoffe, welche in Gasform die Sonnenatmosphäre bilden, obgleich diese Gase nach dem Zeugnis des Spektroskops (s. das Lichtkapitel) zum Teil aus Metalldämpfen bestehen. Wo aber an einzelnen Stellen durch irgend welche besonderen Einwirkungen die Temperatur eine niedrigere wird, können die ersten Verbindungen sich bilden. Es finden Kondensationen statt, deren spezifisch schwerere Produkte tiefer sinken. Hier aber müssen sie wieder höheren Temperaturen begegnen, die durch



auf der Erdoberfläche gebildet worden zu sein, sondern können auch in der Tiefe sich auskristallisiert haben, als die in das Innere fortschreitende Abkühlung dies gestattete. Beim Kristallisieren dehnen die meisten Körper sich mit ungeheurer Gewalt aus; durch solche Prozesse müssen im Erdinneren Hebungen der überliegenden Schichten veranlaßt werden. Wir haben hierin jedenfalls einen, wenn auch wohl nicht bedeutenden Teil der Kraft zu suchen, welche die Urgebirge geschaffen hat und wohl auch heute noch an der Gebirgsbildung mitwirkt. Wie lange aufgespeicherte Spannungen der Druckkräfte in den Erdschichten sich plötzlich lösen und dadurch die sogenannten tektonischen Erdbeben hervorrufen, so kann die Lösung chemischer Spannungen in jenen Grenzschichten die Ursache von vulkanischen Erscheinungen werden. Auch in diesen Tiefen, wo ein ungeheurer Druck die Materie zu felsenfester Starre zwingt, können noch Kreisläufe in ihren Zuständen stattfinden, die wärmetheoretisch denen in unserer Atmosphäre oder auf der Sonnenoberfläche durchaus gleichen. Nur die Stufen haben sich geändert. Denn auch die feste Erdoberfläche wogt auf und ab und hat ihre Stürme, deren Dauer sich nach Jahrhunderttausenden bemißt. Die erstarrten Wirbelbewegungen dieser Stürme des Erdreiches erkennen wir deutlich in den Faltungen seiner Schichten.

g) Ausdehnung fester Körper durch die Wärme.

Wir haben uns im vorangegangenen meist nur mit den Wärmeerscheinungen bei gasförmigen oder flüssigen Körpern befaßt, weniger mit den festen. Im allgemeinen zeigen die Körper im festen Zustand keine anderen Wärmeeigenschaften als in den anderen beiden Zuständen. Sie dehnen sich durch Wärmezufuhr aus und zwar in sehr verschiedenem Maße, meist weniger bei größerer normaler Dichte, doch ohne eine bestimmte Regel darüber aufzuweisen. Die mehr und mehr vorschreitende Unfreiheit der molekularen Bewegung bringt offenbar je nach der atomistischen Zusammensetzung des Stoffes Unregelmäßigkeiten hervor, deren Ursachen wir noch nicht genauer übersehen.

Aber die Kraft, mit der diese Ausdehnungen oder Zusammenziehungen erfolgen, ist immer eine sehr große. Folgender Vorlesungsversuch pflegt zur Veranschaulichung dieser Kraft gemacht



Zerbrechen eines in eine eiserne Stange gespannten Eisenstiftes durch Wärmewirkung.

zu werden. Durch ein Loch in einer Stange aus Schmiedeeisen AA steckt man einen starken gußeisernen Stift S und befestigt diesen so in einem Lager, daß seine Enden sich nicht bewegen können (s. die obenstehende Abbildung). Die Eisenstange ist an ihrem einen Ende eingeschraubt, an dem anderen befindet sich das scharf ausgeränderte Loch, wie es die Zeichnung noch näher veranschaulicht. Hat man nun alles genau eingepaßt, während die Stange rotglühend ist, so wird ihre Zusammenziehung beim Abkühlen den starken Gußeisenstab zerbrechen. Bei Belastung würde der Druck oder Zug vieler Zentner erst ausreichen, um diesen

Bruch zu bewirken. Eine Messung der Ausdehnung bei Wärmezufuhr gestattet das Pyrometer, bei welchem der sich ausdehnende Stab einen Fühlhebel bewegt, dessen Ausschlag auf einer Teilung abzulesen ist (s. die nebenstehende Abbildung).

Die genaue Kenntnis der Ausdehnung fester Körper ist für die Bedürfnisse des alltäglichen Lebens, für Baukonstruktionen, die Herstellung wissenschaftlicher Instrumente &c., von großer Wichtigkeit. Für die höchsten Fragen der Meßkunst, also für die genaue Erforschung aller Gesetze der Natur, ist die Kenntnis der Veränderlichkeit des Grundmaßes bei den verschiedenen Temperaturen, unter denen es benutzt werden muß, durchaus grundlegend. Ein Fehler in der Annahme eines betreffenden Ausdehnungskoeffizienten beeinflußt sowohl unsere Kenntnis von den allerkleinsten Wellenbewegungen des unsichtbaren Äthers wie die der gewaltigsten Himmelskörper. So hat der Forscher unausgesetzt ein Heer von Fehlern zu bekämpfen, die trotz aller Vollkommenheit seiner theoretischen Anschauungen sein praktisches Wissen immer unvollkommen lassen werden.



Pyrometer.

Wir geben im folgenden eine Auswahl von Ausdehnungskoeffizienten fester Körper:

	Ausdehnung für 1° bei +40° 0.000	Veränderung der letzten Dezimale für 1° Erhöhung der Mitteltemperatur von 40°		Ausdehnung für 1° bei +40° 0.000	Veränderung der letzten Dezimale für 1° Erhöhung der Mitteltemperatur von 40°
Diamant	00118	+1,44	Stahl	01095	1,52
Steinkohle. . .	02782	2,95	Zinn	02234	3,51
Iridium	00683	0,94	Blei.	02924	2,39
Platin	00905	1,06	Zink	02918	−1,27
Platin-Iridium .	00882	0,76	Aluminium . .	02313	+2,29
Gold	01443	0,83	Magnesium . .	02694	6,84
Silber	01921	1,47	Schwefel . . .	06413	33,48
Kupfer	01690	1,83	Indium . . .	04170	42,38
Eisen	01210	1,85	Paraffin . . .	27854	99,26

Die Ausdehnungskoeffizienten geben an, um den wievielten Teil der Länge sich die betreffende Substanz ausdehnt, wenn man sie um einen Grad erwärmt. Diese Werte zeigen sich aber veränderlich für verschiedene Temperaturen, innerhalb deren die Temperaturschwankungen selbst stattfinden. Die angeführten Zahlen gelten nur für die Temperatur von + 40°. Die zweite Zahlenreihe gibt deshalb die Veränderung der letzten Stelle der Koeffizienten für eine Erhöhung der Durchschnittstemperatur von 40°. Beide Zahlenreihen zeigen eine große Mannigfaltigkeit, aus welcher aber vorläufig noch kein Gesetz zu entnehmen ist. Ein und dasselbe Element, der Kohlenstoff, hat als Diamant und als Steinkohle sogar ganz verschiedene Ausdehnung. Im allgemeinen zwar sind die dichteren, spezifisch schwereren Stoffe auch die weniger ausdehnbaren, und ihr Koeffizient unterliegt auch gleichzeitig den geringsten Änderungen der Temperatur. Zu diesen gehört Platin und das seltene Metall Iridium. Eine

Mischung beider in einem bestimmten Prozentsatze zeigt von allen Stoffen den konstantesten Ausdehnungskoeffizienten. Die Zahl in der zweiten Reihe unserer Tafel, 0,76, ist die kleinste, d. h. die überhaupt sehr geringe Ausdehnung des Platin-Iridiums findet fast genau der Temperatur proportional statt. Diese Eigenschaft ist sehr wertvoll für die Festlegung eines Urmaßes. Man verfertigt deshalb die Prototypen des Metermaßes, die in den Archiven der Wissenschaft für alle Zeiten die Grundeinheit all unserer Messungen festhalten sollen, aus jener Metalllegierung.



Kompensationspendel.

Die Zunahme des Ausdehnungskoeffizienten mit zunehmender Temperatur, die unter den angeführten Substanzen nur beim Zink eine merkwürdige Ausnahme erfährt, zeigt, daß derselbe von der Lage des Schmelzpunktes abhängt, was auch bei der Vergleichung der Koeffizienten der verschiedenen Substanzen hervortritt, der um so größer wird, je tiefer der Schmelzpunkt für dieselbe liegt. Am größten ist der für das Paraffin, das schon bei $+56^{\circ}$ schmilzt.

Alle diese verschiedenen Zusammenhänge zeigen, daß die Ausdehnung der Stoffe einer allgemeinen Gesetzlichkeit sicher unterliegt, die sich nur unter den hinzutretenden Besonderheiten der einzelnen Stoffe mehr oder weniger verbirgt. Von unserem atomistischen Standpunkt aus sind ja alle diese verschiedenen Substanzen nur verschiedene Gruppierungen der kleinsten Teile eines sonst überhaupt eigenschaftslosen Grundstoffes. Unsere späteren Betrachtungen über die chemischen Eigenschaften der Materie werden uns aber lehren, wie kompliziert diese Gruppierungen jedenfalls sein müssen. Es ist deshalb auch nicht zu verwundern, daß sie in Bezug auf die Wärmebewegungen Eigenschaften aufweisen, die wir theoretisch noch nicht auf einfache Beziehungen zurückzuführen vermögen.

Von den für die Wissenschaft wichtigsten Anwendungen der Ausdehnung fester Körper wollen wir zunächst das auch S. 60 erwähnte Kompensationspendel anführen. Dasselbe besteht (s. nebenstehende Abbildung) aus fünf parallelen Stäben, von denen drei aus Eisen und zwei aus Zink hergestellt sind. Zwei der Eisenstäbe EE sind durch ein Querstück a direkt mit der Aufhängung des Pendels verbunden. Sie haben unten, bei der Linse, ein anderes Querstück b, an welchem die beiden Zinkstäbe ZZ befestigt sind; diese tragen ihrerseits oben an dem Stück c den dritten Eisenstab S, der durch eine Lücke in b hindurchgeht und die Linse trägt. Verlängern sich durch die Wärmeausdehnung die Stäbe E, so wird b weiter nach unten gerückt. Es würde also auch c nach unten verschoben, wenn nicht die Zinkstäbe Z sich nach oben ausdehnten. Man kann nun die Länge der Stäbe E, S und Z so einrichten, daß die Verlängerung von E und S der Erhöhung des Stückes b durch die Zinkstäbe gleichkommt, so daß die Entfernung der Linse vom Aufhängungspunkt oder die Pendellänge von der Ausdehnung durch Wärme nicht geändert wird. Eine einfache Betrachtung ergibt, daß dies stattfindet, wenn $E + S = fZ$ ist, wo f das Verhältnis der Ausdehnungskoeffizienten der beiden Stoffe bedeutet. Für Eisen und Zink ist $f = 292:121$ (s. die Tabelle auf Seite 189) $= 2{,}41$. Der mittlere Stab S und einer der beiden Seitenstäbe E müssen also zusammen 2,41 mal

länger sein als einer der Zinkstäbe Z, wenn das Kompensations- oder Rostpendel seine Aufgabe erfüllen soll.

Lötet man zwei Streifen von Metallen, die sich ungleich ausdehnen, zusammen, so müssen sie sich bei Temperaturveränderungen krümmen; das sich mehr ausdehnende Metall bleibt bei steigender Temperatur an der äußeren Peripherie der Krümmung, die länger ist als die innere, bei sinkender dagegen innen. Diese Erfahrung hat zur Konstruktion von Metallthermometern geführt, bei welchen die Ausdehnung und Zusammenziehung einer Spirale S zwei Zeiger dg bewegt und diese die extremen Temperaturen angeben läßt (s. die obere Abbildung, S. 192). Auch der Einfluß der Temperaturschwankungen auf den Gang der Federuhren wird durch die Verwertung solcher aufeinander gelöteter Metallstreifen von verschiedener Ausdehnung, die an der Unruhe angebracht werden, aufgehoben (s. die untere Abbildung, S. 192).

Die in unserer Tabelle angegebenen Ausdehnungskoeffizienten verstehen sich, mit Ausnahme des Diamanten, der nur zum Vergleich mit der Steinkohle mit aufgenommen ist, für den sogenannten amorphen, nicht kristallisierten Zustand der betreffenden Stoffe. Schon das Beispiel des Diamanten zeigt, daß die kristallisierte Form derselben Substanz wesentlich andere Ausdehnungsbedingungen hat. Dieselben sind sogar bei ein und demselben Kristall verschieden für die Richtungen der Achsen seiner geometrischen Figur. Die Verhältnisse werden naturgemäß um so verwickelter, je vielgestaltiger die Formen sind, in denen sich die Materie in ihrem ureigenen Drange nach Vervollkommnung weiter aufbaut. Später kommen wir auf die Eigenschaften der Kristalle im besonderen zurück. Wir führen hier noch die Ausdehnungskoeffizienten der drei für die Thermometrie wichtigsten Flüssigkeiten, Alkohol, Wasser und Quecksilber, an.

	Dichtigkeit bei 0°	Grenzwerte für t	a 0,00	b 0,00000	c 0,0000000
Alkohol	0,81510	−33° bis +78°	+10486301	+17510	+0134
Wasser	1,00000	0 „ 25	− 0061045	+77183	−3734
„	1,00000	+25 „ 50	− 0065415	+77587	−3541
„	1,00000	50 „ 75	+ 0059160	+31849	+0728
„	1,00000	75 „ 100	+ 0086450	+31892	+0245
Quecksilber . . .	13,596	0 „ 350	+01790066	+00252	—

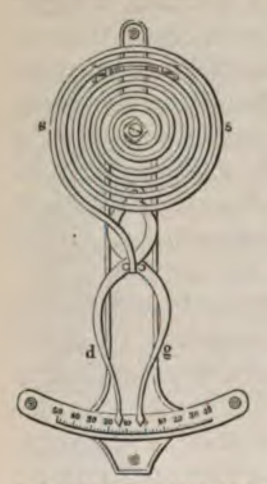
Man findet mit Hilfe dieser Tabelle die Volumenausdehnung von 0° bis zu einer gegebenen Temperatur t durch die Formel $at + bt^2 + ct^3$, wo a, b, c den mit diesen Buchstaben in obiger Tafel überschriebenen Zahlen entsprechen, die den am Kopfe der Kolumnen befindlichen Nullen als Dezimalbruch hinzuzufügen sind. Die Werte für Alkohol sind nach Pierre, die für Wasser nach H. Kopp, die für Quecksilber nach Regnault aufgeführt. Wir haben hier ausnahmsweise möglichst genaue Zahlen angeführt, um ein Beispiel für die Präzision zu geben, mit welcher die moderne Physik arbeitet.

Aus der letzten Zahlenreihe sehen wir, daß das Quecksilber einen sehr großen Ausdehnungskoeffizienten hat, der aber mit der Temperatur nur sehr geringen Schwankungen unterworfen ist. Deshalb ist diese Flüssigkeit in so vorzüglicher Weise zu Temperaturmessungen geeignet.

b) Wärmeleitung und Wärmestrahlung.

Um alle bisher dargestellten Erfahrungen über die Erscheinungen der Wärme zu sammeln, mußten wir den verschiedenen Körpern entweder Wärme zuführen oder entnehmen. Dies konnte nur mit Hilfe von Wärmequellen geschehen, deren es sehr verschiedene gibt, da fast jede Äußerung einer Naturkraft, als einer Bewegung, in Wärme umgesetzt werden kann. Wir sahen

zunächst, daß durch Druck Wärme entsteht, und es ist bekannt, daß man sie auch durch Reibung hervorbringen kann. Die Urvölker erzeugten auf diese Weise Feuer, und heute noch sind bei uns Reibungsfeuerzeuge im Gebrauch (s. die Abbildung, S. 193). Auch unsere Zündhölzchen muß man ja zuvor anreiben, um die Anfangstemperatur zu erzeugen, bei der jener chemische Prozeß eingeleitet werden kann, der die Flamme hervorruft und nun die Temperatur durch den Verbrennungsprozeß schnell steigert. An die Wahrnehmung, daß selbst die Reibung zweier Eisstücke bei Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkte Wärme erzeugt, die sie zum Schmelzen bringt, wurden seinerzeit wichtige theoretische Betrachtungen geknüpft. Wäre nämlich die Wärme eine Art von Flüssigkeit, wie man es früher glaubte, so könnte die noch so innige Berührung zweier kalter Körper doch niemals eine höhere Temperatur erzeugen, als diese selbst besitzen. Als weitere Wärmequellen erkannten wir die chemischen Reaktionen, und es ist wohl allgemein bekannt, daß auch die Elektrizität große Wärmemengen hervorzubringen vermag. Am allgemeinsten aber tritt der Fall ein, daß ein Körper seine Temperatur auf Kosten eines anderen Körpers erhöht, der mit ihm in mittelbare oder unmittelbare Berührung kommt: die Wärme wird von einem wärmeren in einen kälteren Körper geleitet, sie fließt scheinbar aus dem einen in den anderen hinüber. Die Eigenschaften dieses Wärmeleitungsvermögens der Körper hat zu der alten Anschauung der Wärme als einer Flüssigkeit geführt. Die Wärme benimmt sich in der Tat in dieser Hinsicht etwa wie Wasser, das man unter einem bestimmten Drucke durch eine poröse Schicht fließen läßt. Die Geschwindigkeit der Überführung des Wassers aus einem höheren in ein tiefer gelegenes Reservoir wird dann offenbar zunächst von dem Niveau-Unterschied der beiden Reservoire, ferner von dem Grade der Porosität des Filters und endlich von seinem Querschnitt abhängen. Ebenso nehmen wir wahr, daß die Geschwindigkeit, mit der sich die Temperaturen zweier Körper, die miteinander in Berührung sind, ausgleichen, zunächst von ihrer Temperaturdifferenz, die man vergleichsweise auch Temperaturgefälle nennt, dann von der besonderen molekularen Beschaffenheit der Körper (Wärmeporosität) und drittens von der Größe ihrer Berührungsflächen abhängt. Soll die Wärme nicht von einem zum anderen Körper überfließen, sondern nur durch eine Substanz hindurchgeleitet werden, so wird auch die Körperausdehnung des „Wärmefilters“, etwa die Dicke der Platte, durch welche die Wärme fließt, einen weiteren Einfluß haben.



Metallthermometer zur Bestimmung des Maximum und Minimum von Herrmann u. Pfister. Vgl. Text, S. 191.


Federuhr. U = Unruhe. Vgl. Text, S. 191.

Vom Standpunkt unserer atomistischen Anschauung verstehen wir ohne weiteres, daß die Geschwindigkeit, mit der die Wärme, sagen wir, eine Metallplatte durcheilt, um von einem mit heißem Wasser angefüllten Gefäße zu einem solchen mit kaltem Wasser zu gelangen, das durch jene Platte vom ersteren getrennt ist, von dem Temperaturunterschiede der beiden Wassermengen abhängt, weil die Temperaturgrade für uns Geschwindigkeitsgrade der Bewegungen der Moleküle sind. Diese Geschwindigkeitsunterschiede sind aber wieder nichts anderes als **Druckunterschiede**, die bei der Übertragung durch die Stöße der Moleküle gegeneinander entstehen. Nach den allgemeinen Prinzipien der Mechanik ist dieses Temperaturgefälle deshalb völlig zu vergleichen mit dem Druck eines Wassergefälles von einer bestimmten Höhe. Daß ferner die Anzahl der Moleküle des leitenden Stoffes und seine Fläche und Dicke die Leitungsgeschwindigkeit beeinflussen, ist auch sofort einzusehen, da ja doch alle diese Moleküle zuerst selbst bewegt werden müssen, ehe sie einen Einfluß auf die Bewegung derjenigen Moleküle üben können, in welche die Wärme geleitet werden soll. Endlich muß die atomistische Zusammensetzung der Moleküle die Geschwindigkeit der Übertragung beeinflussen, weil sie den Widerstand bestimmt, den die Moleküle den Stoßwirkungen entgegenstellen. Ohne nähere Prüfung sollte man voraussetzen, daß aus der Art der Materie sich ein bestimmtes Verhältnis der Wärmeleitung zum Wärmeaufnahmevermögen, also der spezifischen Wärme, ergeben müßte. Für die Flüssigkeiten ist dies auch annähernd der Fall. Für die festen Körper kommt aber die innere Reibung noch mit in Betracht, die mit der Dichtigkeit zunimmt. Wir begegnen auch hier wieder der Erscheinung, daß die aus der Beobachtung folgenden Zahlenreihen zweifellos gesetzliche Beziehungen durchschimmern lassen, deren präziser Ausdruck sich jedoch noch unter besonderen Einflüssen verhüllt, die wir wegen der komplizierten Verhältnisse noch nicht weiter verfolgen können.



Reibungsfeuerzeug. Nach J. Ranke, „Der Mensch“. Vgl. Text, S. 192.

Wir lassen hier einige Zahlen für das Wärmeleitungsvermögen von Stoffen folgen. Die Zahlen geben an, wieviel Kalorien durch einen Quadratzentimeter des betreffenden Stoffes in der Sekunde fließen, wenn das Temperaturgefälle 1° beträgt.

Silber	1,096	Blei	0,078	Wasserstoff	0,000332
Kupfer	0,680	Quecksilber	0,016	Sauerstoff	0,000056
Zink	0,280	Wasser	0,00124	Stickstoff	0,000052
Eisen	0,152	Alkohol	0,00049	Kohlensäure	0,000032

Aus diesen Zahlen sehen wir, daß das Wärmeleitungsvermögen im allgemeinen mit der Dichtigkeit der Stoffe abnimmt. Dies scheint auch ganz selbstverständlich, da, um besser leiten zu können, eben mehr Leitendes, d. h. mehr Materie, vorhanden sein muß. Aber man stößt auch hier wieder auf Ausnahmen; so leitet Wasserstoff besser als Sauerstoff, obgleich letzterer spezifisch schwerer ist.

Jedenfalls aber sind die Gase die **schlechtesten Wärmeleiter**. Die Atmosphäre der **Erde** wirkt deshalb wie ein **wärmender Mantel** für die Lebewesen an der Oberfläche des Planeten und wird überhaupt zur notwendigen Lebensbedingung für sie. Einen großen Teil der unserer Erde von der Sonne zugestrahlten Wärme nimmt zunächst die Atmosphäre

auf und bewirkt dadurch in ihrem gewaltigen Kreislauf den notwendigen Wärmeausgleich zwischen Tag und Nacht, zwischen den Jahreszeiten und den klimatisch ungleichen Verhältnissen von Meer und Land. Die dann noch weiter in den Erdboden einstrahlende Wärmemenge läßt sie nicht so leicht wieder hindurch, während das besser Wärme leitende Gestein sie schnell aufgenommen hatte.

Anders sind diese Verhältnisse auf dem **Monde**, der sicher nur eine ungemein dünne Lufthülle besitzt. Für ihn sind Tag und Nacht bekanntlich je vierzehn unserer Tage lang. Durch die andauernde Bestrahlung muß das Gestein dort während jenes langen Tages sehr hohe Temperaturgrade annehmen, die jedenfalls jede Lebensentfaltung auf ihm unmöglich machen. Nach Sonnenuntergang aber tritt sofort die wahrscheinlich dem absoluten Nullpunkte naheliegende Kälte des Weltraums fast ohne Übergang an die Stelle dieser Bestrahlung. Solche Extreme sind jeder Lebensregung verderblich. Wie wir indes schon bei einer früheren Gelegenheit erwähnten (S. 182), wird durch die Sublimation des Eises und die während des Tages eintretende Verdampfung des entstandenen Wassers eine Atmosphäre mit sehr geringem Druck wahrscheinlich auch auf dem Mond gebildet, beziehungsweise erhalten worden sein. Diese vermag vielleicht örtlich, z. B. in den tiefliegenden **Wallebenen** (s. die nebenstehende Abbildung), wo der Atmosphärendruck entsprechend höher sein muß, jene Temperaturextreme ein wenig zu mildern, und man hat in der Tat in solchen Gebieten Spuren einer Vegetation an einer grünlichen Färbung wahrzunehmen geglaubt, die bald nach Sonnenaufgang erscheint, aber im Laufe des langen Tages dann wieder verschwindet, wahrscheinlich also von der Sonnenglut wieder versengt wird, eine Vegetation jedenfalls nur allerdürftigster Art, die ein Eintagsleben führt.

a



b



Wallebene auf dem Monde: a bei aufgehender Sonne; b bei Mittagsbeleuchtung. Nach Neison. Aus W. Meyer, „Das Weltgebäude".

In der Mitte zwischen diesen Verhältnissen auf der Erde und dem Monde liegen wohl die auf dem **Mars**. Dieser Planet besitzt eine Atmosphäre, deren Druck vielleicht nur gleich der Hälfte des bei uns herrschenden ist. Sein Luftmantel schützt ihn also weniger gegen die Extreme des Jahreszeitenwechsels. Wir sehen deshalb in unseren Fernrohren, daß dort im Winter selbst bis gegen den Äquator hin gelegentlich Schnee fällt, während im Sommer sogar die Pole fast gänzlich eisfrei werden. Daß die Wärmestrahlen der Sonne von dünner Luft leichter durchgelassen werden, erfahren die Alpenwanderer oft in recht empfindlicher Weise, wenn sie sich in den Regionen des ewigen Schnees an Gesicht und Händen, die den Sonnenstrahlen direkt ausgesetzt sind, die Haut verbrennen.

Aus dem Vorangegangenen könnte man nun schließen, daß der leere Raum überhaupt keine Wärme zu leiten vermag, also ein vollständiger Abschluß für dieselbe sein müsse. Das widerspricht aber den Tatsachen der alltäglichsten Wahrnehmung. In jeder Sekunde werden ungeheuere Wärmemengen von der Sonne zu uns herübergeleitet, und nur durch das ganz gewaltige Temperaturgefälle zwischen Sonne und Erde wird der Kreislauf der atmosphärischen Maschine

in Bewegung erhalten und alle Lebenstätigkeit der organischen Welt ermöglicht. Dennoch trennt uns von der Sonne ein weiter leerer Raum, der nicht mehr von Materie, sondern nur von jenen Äther- oder Uratomen durcheilt wird, die nach unserer Ansicht die Träger der Schwerkraft sind und, wie wir im nächsten Kapitel sehen werden, auch das Licht vermitteln. Diese müssen also auch die Wärme übertragen. Wir können uns im Laboratorium leicht davon überzeugen. Bringen wir zwei ungleich warme Körper in einen luftleeren Raum, so daß sie sich nicht berühren und auch von außerhalb keine Wärme erhalten können, so gleichen sie dennoch ihre Temperatur allmählich aus, ebenso, als wenn man sie mit Luft oder mit Wasser oder sonst einer wärmeleitenden Substanz umgeben hätte; nur die Geschwindigkeit des Ausgleichs ist eine andere. Es findet eine **Wärmestrahlung** durch den leeren Raum statt. Nach der gebräuchlichen Anschauungsweise der Physik wird diese Wärmestrahlung durch die Schwingungen des Äthers übertragen, wie auch die Lichtstrahlung, die wir im nächsten Kapitel näher studieren werden. Nach der hypothetischen Grundidee über das Wesen der Naturkräfte, die wir in diesem Werke verfolgen, haben wir uns den Strahlungsvorgang indes so vorzustellen, daß die auf die Moleküle der Körper stoßenden Ätheratome von diesen nach allen Seiten zurückgeworfen werden, wie wir es auch schon für die Erklärung der Gravitation notwendig fanden. Das Molekül nun, das sich in einer Wärmebewegung befindet, muß die Uratome in denselben Zeitintervallen und mit denselben Kraftunterschieden stärker oder schwächer zurückstoßen, wie es seinem Temperaturgrad entspricht. Daß diese Uratome eine sehr beträchtliche Eigenbewegung haben, die wir ja als die wahrscheinliche Ursache der Gravitation erkannten, tut hier nichts zur Sache. Die von ein und demselben Molekül ausgehenden Temperaturschwingungen teilen sich dadurch vielen aufeinander folgenden Uratomen mit, die auf dasselbe stoßen, und diese müssen sich dann nach Abzug der Eigenbewegung ebenso verhalten wie sonst stillstehende Atome, die nur in die Temperaturschwingungen mitversetzt werden. Diese mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Moleküle des warmen Körpers schwingenden Uratome breiten sich nun rings um denselben aus und treffen also auch Körper in der Umgebung, deren Molekülen sie durch ihre Stoßwirkungen dieselbe Geschwindigkeit zu geben trachten, die sie selbst haben, wodurch sie den Temperaturausgleich herbeiführen.

Von jedem Körper gehen Wärmestrahlen aus, solange er nicht bis auf den absoluten Nullpunkt abgekühlt ist, und die nähere Untersuchung dieser Wärmestrahlen hat ihre völlige **Übereinstimmung mit den Lichtstrahlen** ergeben. Eine Steigerung der Schwingungsgeschwindigkeit der Moleküle eines beliebigen Körpers über eine gewisse Grenze bringt denselben zum **Leuchten**. Diese Grenze liegt für alle Körper, gleichviel, von welcher molekularen Zusammensetzung sie sind, bei 525°, bei welcher Temperatur die **Rotglut** eben beginnt. Zwischen 800 und 1000° zeigen alle Körper ein leuchtendes Kirschrot, das dann bis 1200° sich immer heller orange färbt und schließlich in Weißglut übergeht, die bei 1500—1600° ihre blendendste Kraft erreicht. Eine genauere Bestimmung der Farbe eines glühenden Körpers kann also zur Ermittelung seiner Temperatur führen.

Man könnte sich denken, daß die Körper von 525° an neben den Wärmestrahlen nun auch Lichtstrahlen auszusenden beginnen, so daß es sich also um zwei ihrem Wesen nach verschiedene Strahlengattungen handeln würde, die von jenem Augenblick an nur nebeneinander hergehen. Das war auch die ältere Anschauung. In Wirklichkeit aber sind **Licht und strahlende Wärme ein und dieselbe Erscheinung**, ein und dieselbe Bewegung der Uratome, die sich als Wärmereiz auf unseren Hautnerven und von einer gewissen Geschwindigkeit der aufeinander folgenden Atomstöße an auch auf unserer Netzhaut als Lichtreiz zu erkennen gibt.

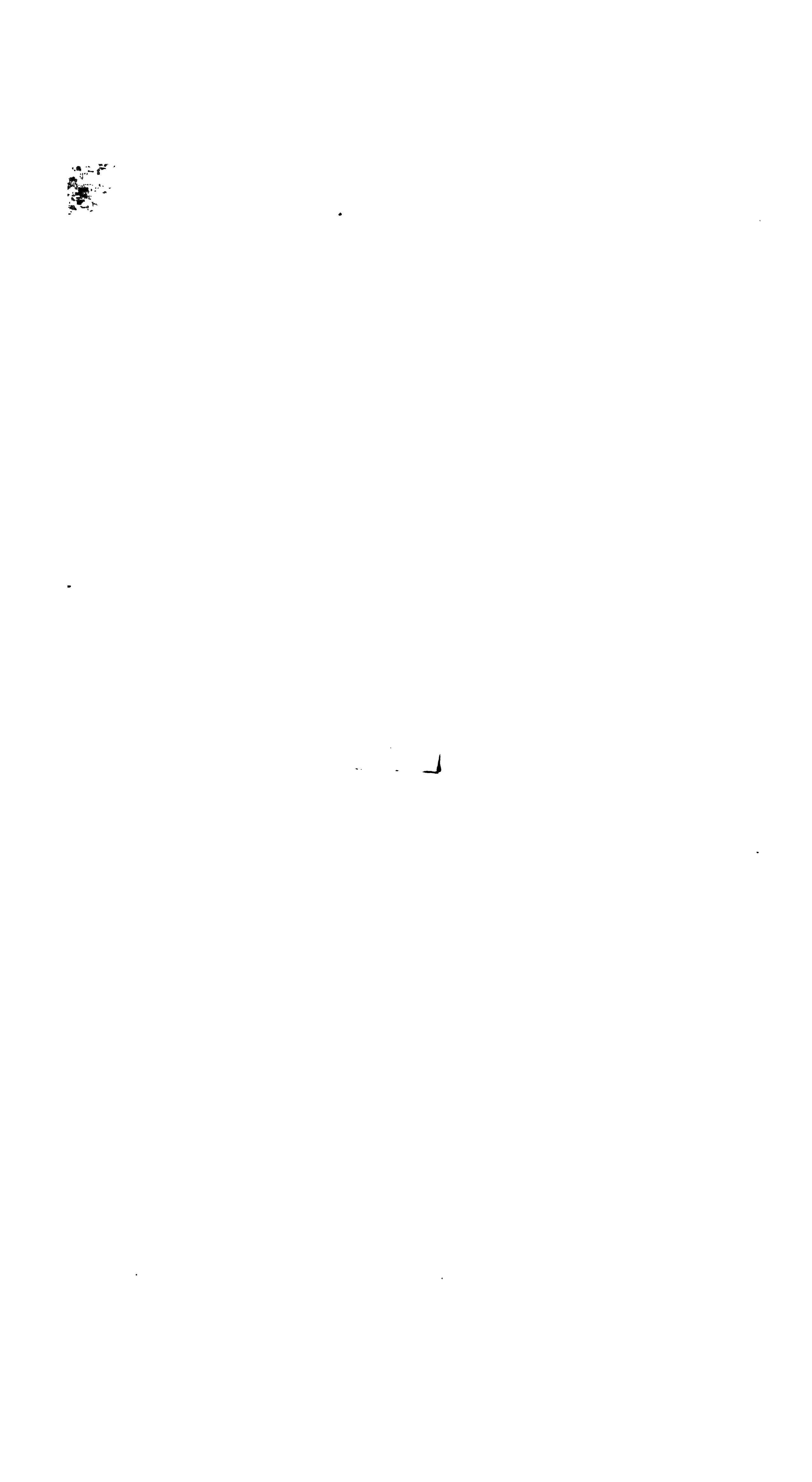
Da wir uns nun mit den Eigenschaften des Lichtes im folgenden Kapitel eingehend zu beschäftigen haben, so wollen wir hier von den Eigenschaften der strahlenden Wärme nur ein zusammenfassendes Bild geben.

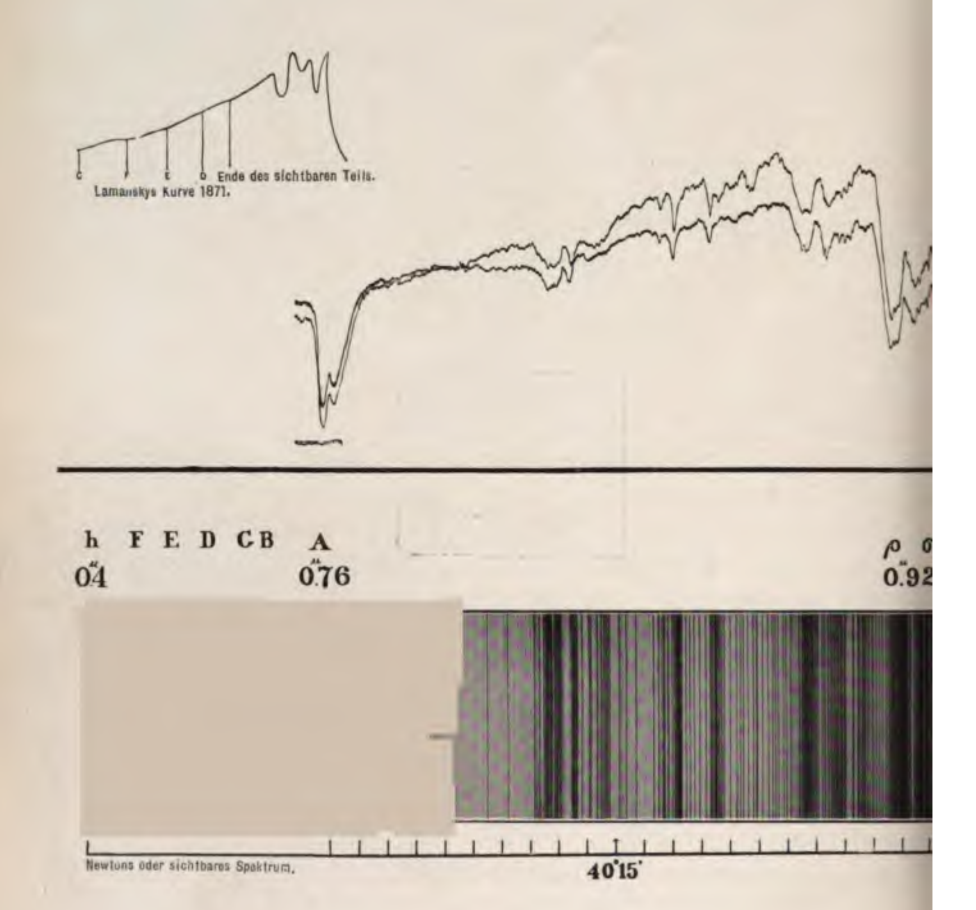
Es ist bekannt, daß man das Licht irgend einer Lichtquelle durch das Spektroskop (s. das Lichtkapitel) in seine einzelnen Farben zerlegen kann. Das Licht eines weißglühenden Körpers zeigt dabei alle Farben des Regenbogens zugleich. Wir erfuhren nun vorhin, daß ein von der ersten Rotglut ab mehr und mehr erhitzter Körper gleichfalls alle Farben des Regenbogens durchläuft, bis er weißglühend wird. Deshalb können wir von vornherein annehmen, daß auch die Wärmestrahlen eines weißglühenden Körpers aus allen diesen Wellenlängen zusammengesetzt sind. Es gibt nun Körper, die die Wärmestrahlen durchlassen und brechen wie etwa Glas die Lichtstrahlen, oder vielmehr, da Wärme- und Lichtstrahlen identisch sind, Körper, die sowohl auf die Wellenlängen einwirken, die die sichtbaren Lichtstrahlen hervorbringen, als auch die größeren Wellenlängen geringerer Temperaturgrade beeinflussen. Es läßt sich demnach auch ein Wärmespektrum ausbreiten. Die Untersuchung geschieht mit für die Wärme außerordentlich feinfühligen Instrumenten, der Thermosäule oder dem Bolometer, bei denen die Wirkungen der Elektrizität eine wesentliche Vermittlerrolle spielen. Deshalb können wir sie erst später beschreiben.

Wir geben in beifolgender Tafel das durch solche Instrumente ermittelte Wärmespektrum der Sonne wieder. Es ist das berühmte sogenannte „Neue Spektrum" von Langley, an dessen Herstellung der amerikanische Astrophysiker 20 Jahre gearbeitet hat. Ganz links ist das sichtbare Sonnenspektrum abgebildet. Wir sehen dasselbe, wo die Lichtwirkung wesentlich vermindert ist, von dunkeln Linien durchzogen, den sogenannten Absorptionslinien, deren tiefere Bedeutung wir erst im Lichtkapitel näher kennen lernen werden. An denselben Stellen, wo sich im Lichtspektrum diese Absorptionslinien befinden, zeigen sich auch starke Herabminderungen der Wärmewirkung: das Wärmespektrum ist in allen Einzelheiten mit dem Lichtspektrum übereinstimmend. Dagegen zeigt das erstere über das Lichtspektrum hinweg noch eine wesentliche Verlängerung, die von Wärmestrahlen herrührt, deren Wellenlänge weit unter der der Rotglut liegt. Die Absorptionslinie A bezeichnet etwa das äußerste rote Ende des sichtbaren Spektrums. Sie hat, wie spätere Untersuchungen zeigen werden, eine Wellenlänge von etwa 0,0008 mm. Langley aber konnte die Wärmestrahlen noch bis zur Wellenlänge 0,005 mm verfolgen, wie unsere Darstellung zeigt.

Wenn für uns mit jener letztgenannten Wellenlänge das Wärmespektrum aufhört, so liegt dies nur daran, daß die Wirkungen strahlender Wärme von noch geringerer Kraft durch die uns heute zur Verfügung stehenden Mittel nicht mehr zu beobachten sind. In Wirklichkeit müssen die in allen Temperaturen, d. h. mit allen Geschwindigkeiten schwingenden Moleküle der Körper Wellenlängen von jeder Größe zeigen, bis zu unendlich langen, wenn der absolute Nullpunkt der Temperatur erreicht ist. Es durcheilen also nicht nur meter-, sondern selbst meilenlange Ätherwellen den Raum und üben ihre besonderen Wirkungen aus.

Unter diesen Wellenlängen werden sich deshalb auch solche von den Dimensionen der Schallwellen befinden. Es ist vielleicht nicht überflüssig, hier hervorzuheben, daß es ganz falsch sein würde, wenn wir etwa die Wahrnehmung, daß die Wärmeschwingungen unvermerkt in Lichtschwingungen übergehen, nun auch auf eine etwaige Beziehung zwischen Schall und Wärme anwenden wollten. Die Schallwellen sind schwingende Bewegungen der Luftmoleküle selbst, die Wellen der strahlenden Wärme aber sind solche Bewegungen der Ätheratome, die frei zwischen den Luftmolekülen hindurchschwirren. Beide Bewegungen gehen also




C F E D Ende des sichtbaren Teils.
Lamanskys Kurve 1871.
h F E D CB A
0.4 0.76 0.92
40°15'
Newtons oder sichtbares Spaktrum.

wirklich nebeneinander her, wie man es früher von der strahlenden Wärme und dem Licht vermutet hatte; sie geschehen in zwei ganz verschiedenen Medien. Dennoch müssen Beziehungen zwischen den beiden Bewegungen existieren, da solche zwischen den Medien selbst vorhanden sind. Die Luftschwingungen werden sich ebenso dem Äther mitteilen wie die Wärmeschwingungen der Körper: Der Schall muß strahlende Wärme erzeugen, nur ist diese so gering, daß wir nichts mehr davon wahrnehmen können.

Anderseits sind die Schallschwingungen den innermolekularen Schwingungen durchaus vergleichbar, die wir als die Temperatur der Körper bezeichneten. Nur geschehen die ersteren in sehr viel größeren Materiekomplexen auf einmal; es werden größere Luftmassen durch den



Brennspiegelwirkung. Vgl. Text, S. 198.

Schallerreger zugleich in Schwingungen versetzt, während die Temperaturschwingungen in den molekularen Grenzen bleiben. Immerhin muß eine Steigerung der Geschwindigkeit der Schallschwingungen etwa in den festen Körpern schließlich zu einer Grenze führen, wo die Kleinheit der dadurch entstehenden Wellenlängen zu einem Übergange der Schallschwingungen zu den Temperaturbewegungen führt, d. h. wo Schall zu Wärme wird. In gewissem Sinne beobachtet man dies selbst schon unter normalen Verhältnissen. Die bei den Schallschwingungen in der Luft erzeugten Verdichtungen bringen, wie jede Verdichtung, Wärme hervor. Ein Teil der vom Schallerreger der Luft mitgeteilten Energie geht also in Wärme über, die sich aber, wegen der Schnelligkeit der aufeinander folgenden Schallschwingungen, nicht wieder ausgleichen kann. Sie wirkt deshalb auf die Schallgeschwindigkeit in einer bestimmten Weise zurück, indem sie diese gegen die aus der Gastheorie allein folgende Geschwindigkeit der Luftmoleküle etwas vergrößert. Die Theorie ergibt, daß der Beschleunigungsfaktor von den beiden spezifischen Wärmen der Luft c_p und c_v (s. S. 162) abhängt. Man findet ihn rechnerisch gleich 1,41. Schon in unserem Kapitel über den Schall haben wir von demselben Gebrauch machen müssen (s. S. 131).

Alle Erscheinungen, die wir schon beim Schall kennen gelernt haben, finden wir, soweit sie nicht physiologischer Natur sind, bei der strahlenden Wärme wieder und werden sie beim Licht noch näher studieren. Alle Arten von Wellenbewegungen müssen eben, soweit ihre rein mechanischen Wirkungen in Betracht kommen, gleiche Eigenschaften zeigen. Von denselben Spiegeln, welche den Schall reflektieren, wird auch die Wärme zurückgeworfen. Bringen wir in den Brennpunkt eines Hohlspiegels, den wir in der Darstellung auf Seite 138 zu dem Experiment mit der Uhr benutzten, eine Wärmequelle, lassen wir etwa einen elektrischen Funken hier überspringen, so entzündet sich im Brennpunkte des anderen Hohlspiegels ein dort angebrachtes Stückchen Schießbaumwolle (s. die Abbildung, S. 197). Das Wort **Brennpunkt** ist ja diesen Beziehungen entnommen. Auch die Wärme wird, wie der Schall, von glatten, blanken Körpern besser zurückgeworfen als von rauhen, nur ist für die Wärme, entsprechend der größeren Feinheit des sie übertragenden Mediums, der Begriff rauh hier subtiler zu nehmen. Eine mit feinem Ruß bestrichene Fläche ist für Wärme- und Lichtstrahlen vollkommen rauh, sie nimmt alle diese Strahlen in sich auf, sie absorbiert sie, reflektiert keine. Man nennt solchen Körper, der alle Wärmestrahlen absorbiert, **absolut schwarz**. Auch der schon beim Schall wahrgenommenen Erscheinung der **Interferenz**, wonach zwei strahlende Wirkungen, die um eine halbe Wellenlänge nacheinander eintreten, sich gegenseitig aufheben müssen, begegnen wir wieder bei der strahlenden Wärme.

Andere Beziehungen treten nur zwischen Wärme und Licht hervor, weil sie zu fein sind, um in dem groben Medium der Luft auffällig zu werden. Die Wärme- und Lichtstrahlen können eine Anzahl von Stoffen beinahe ungehindert durcheilen; es gibt für sie durchsichtige und undurchsichtige Körper. Für die Wärme muß man hierbei entsprechend die Worte **dia-** und **adiatherman** anwenden. Die verschiedene Durchlässigkeit der Stoffe für diese Strahlen bedingt eine Ablenkung ihrer Richtung: **Die Strahlen werden gebrochen**, und zwar nach dem Grade der Dichtigkeit des durchlässigen Stoffes und zugleich auch nach der Wellenlänge des durchdringenden Strahles. Alle diese Verhältnisse werden wir beim Licht noch näher kennen lernen, wir wollen nur hier verständlich machen, daß trotz der Identität der Wärme- mit den Lichtstrahlen nicht alle durchsichtigen Stoffe zugleich auch diatherman sind. Eine Mischung von Jod und Schwefelkohlenstoff ist fast ganz undurchsichtig, aber sie läßt doch diejenigen Wärmestrahlen durch, die nicht zugleich auch dem sichtbaren Spektrum angehören, die man also als **infrarote Strahlen** bezeichnet. Eis läßt dagegen nur sehr wenige dieser letzteren Strahlen durch, es ist nur durchsichtig für Licht, nicht auch für Wärme. Für die ganze Skala der betreffenden Wellenlängen ist **Steinsalz** durchlässig. Man wendet deshalb gewöhnlich Prismen aus diesem Material an, um ein Wärmespektrum in möglichster Ausdehnung zu entwerfen.

Andere Erscheinungen, wie die Gleichheit des **Emissions-** mit dem **Absorptionsvermögen** der Stoffe, sind bei Wärme und Licht vollkommen übereinstimmend, aber beim Licht so sehr viel klarer zu übersehen, daß wir sie erst dort behandeln wollen.

Hier wird es noch interessieren, die **Kraft der Wärmestrahlung** zu ermitteln, die uns von der **Sonne** zuströmt. Um diese aufzufangen, setzen wir einen vollkommen schwarzen Körper den Sonnenstrahlen aus und messen die Erwärmung, welche er dadurch in einer bestimmten Zeit erfährt. Man findet dabei, daß ein Quadratzentimeter eines solchen schwarzen Körpers, der den senkrechten Sonnenstrahlen an der Grenze unserer Atmosphäre ausgesetzt würde, in einer Minute etwa 3 Kalorien aufnimmt. Diese Wärmemenge, nach Seite 163 in Arbeit umgesetzt, ist also im stande, z. B. 1 g Wasser in einer Minute 3 mal 428 m, d. h. bis in die Höhe





Der Niagarafall.

der Wolken zu heben. Diese Zahl bezieht sich nur auf die jedem einzelnen Quadratzentimeter der Oberfläche unserer Atmosphäre zufließende Arbeitskraft infolge des ungeheuren Temperaturgefälles zwischen Sonne und Erde. Berechnen wir danach die unserem ganzen Planeten zukommende Kraft, so erhalten wir 36,000 Millionen Pferdestärken in der Sekunde. Mit etwa der Hälfte dieser Kraft arbeitet die atmosphärische Maschine, um ihren gewaltigen Kreislauf in Bewegung zu erhalten. Nicht mehr als die andere Hälfte gelangt bis zur Erdoberfläche, um diese zu erwärmen und alle die Leben erweckenden und fördernden Prozesse zu veranlassen, deren bewundernde Zeugen wir alltäglich sind. Gewaltige Naturschauspiele, wie der



Elektrische Kraftstation am Niagara. Nach Photographie.

Niagarafall (s. die beigeheftete Tafel „Der Niagarafall"), der etwa 17 Millionen Pferdestärken in der Sekunde entwickelt, verbrauchen nur kleine Bruchteile der uns beständig zufließenden Wärmekraft der Sonne. Aber wieder nur einen ganz kleinen Teil dieses Teiles kann der Mensch zu nützlichen Arbeitsleistungen verwerten, wie z. B. in den oben wiedergegebenen Turbinenwerken am Niagara, welche namentlich der Elektrizitätserzeugung dienen.

Man hat es versucht, jene Wärmemenge, welche die Sonne uns aus einer Entfernung von 20 Millionen Meilen zustrahlt, mit der strahlenden Wärme eines Körpers von bekannter Temperatur zu vergleichen, um daraus die Temperatur der Sonne zu bestimmen. Die befriedigende Lösung dieser Frage aber stößt sowohl auf große experimentelle als auch theoretische Schwierigkeiten, weil die Erfahrungen über so hohe Temperaturgrade, um die es sich hierbei handelt, uns noch gänzlich fehlen. Die Resultate der betreffenden Untersuchungen schwankten deshalb noch bis in die jüngere Zeit zwischen sehr weiten Grenzen, von 10 Millionen bis auf

5000 Grad herab. Heute neigt man, wie schon bei anderer Gelegenheit angeführt wurde, zu der Meinung hin, daß die Temperatur der Sonnenoberfläche zwischen 6000 und 8000° liege.

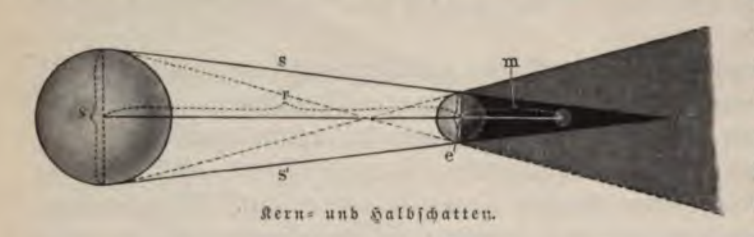
Von der gesamten Kraft des großen Zentralgestirns aber kommt der Erde, wie schon am Anfang dieses Kapitels erwähnt wurde, nur der 2725millionste Teil zu. Ähnlich kleine Teile fangen die anderen Planeten auf; alles übrige strahlt scheinbar ohne besondere Aufgabe in den leeren Weltraum hinaus. In Wirklichkeit muß jeder Sonnenstrahl irgendwo im Weltgebäude auf einen anderen Stern oder sonst eine andere Ansammlung von Materie treffen und ihm seine Energie übertragen. Nicht nur vor unseren Augen, in unserem engen irdischen Umkreise, sondern auch bis in die entferntesten Himmelsräume hinein suchen sich die Temperaturen auszugleichen; überall müssen die Schwingungen der Moleküle durch ihre beständigen Zusammenstöße ihre Ausdehnung verkleinern, müssen die Temperaturen der Körper sinken und die Fähigkeiten der Arbeitsleistung nach außen hin sich vermindern, während sich die innermolekularen Kräfte, die wir z. B. auch als gebundene Wärme kennen lernten, vergrößern. Es ist überall ein Strömen von lebendiger Kraft zur latenten zu erkennen, solange es noch irgendwo ein Temperaturgefälle gibt. Während die Gesamtenergie des Weltalls stets dieselbe bleibt, entsprechend dem obersten Prinzip des Naturgeschehens, dem der Erhaltung der Kraft, verändert sich doch beständig die Form der Kraft nur nach einer Seite hin. Man bezeichnet dies mit dem Satze, daß die Entropie beständig wächst. Wir haben schon bei früherer Gelegenheit eine Andeutung dieser Beziehungen gemacht (S. 157) und kommen wieder darauf zurück, wenn wir alle Energieformen in der Natur kennen gelernt haben.

8. Das Licht.

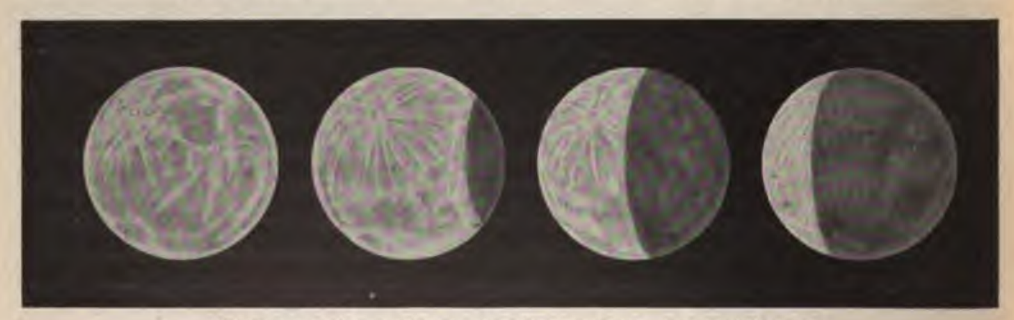
Noch viel mehr als die Wärme erscheint jedem Beobachter der Naturschauspiele, möge er nun seine Blicke in die letzten Tiefen des Universums oder rings um sich her in die Alltäglichkeit richten, oder im Geiste selbst bis in die unerreichbarsten Abgründe des Meeres dringen, als eine allgegenwärtige Wirkung der Naturgewalten das Licht, das mit silbernen Fäden, von Millionen Sonnen ausgehend, alle Weltenräume durchfließt und hier auf unserer Erde das Leben und die Freude weckt. Unzertrennlich von der Wärme, von deren Wirkungen es ja nur ein Teil ist, ist das Licht eine Existenzbedingung alles Lebens. Wo in unserer irdischen Natur die allgemeine Kraftquelle der Sonne ihre strahlenden Wirkungen nicht mehr hinsenden kann, wie in die Tiefsee, da schafft die lebendige Natur aus sich selbst Licht, indem sie ihren Geschöpfen Leuchtorgane mitgibt. Und wenn selbst einige unglückliche Lebewesen ganz ohne Licht für sich allein zu existieren vermögen, so hängt doch die Möglichkeit nicht allein ihres Lebens, sondern der ganzen lebendigen Natur von der geheimnisvollen Tätigkeit des Lichtes ab, die es in der Bildung des Blattgrüns der Pflanzen entfaltet. Dieses Produkt des Lichts versteht es allein, den Sauerstoff, der in den tierischen Körpern zur Erhaltung des Lebens verbraucht und aus ihnen durch die Erde in die Pflanze übergegangen ist, wieder frei zu machen, so daß er immer von neuem in uns verarbeitet werden kann. Würde die Sonne einmal aufhören, uns zu bescheinen, so wären wir dem Erstickungstod ebenso sicher überliefert, als wenn uns die Luft entzogen wird.

Von den allerfernsten Weltkörpern, die unserem noch so verschärften Blick als durchmesserlose Punkte erscheinen, strahlt uns das Licht entgegen. Von allen Wirkungen der Natur ist es die durchdringendste, sinnfälligste; in unserem Auge besitzen wir ein sehr feinfühliges Organ dafür. Wir brauchen für die Begrenzung des Gebietes von Naturerscheinungen, die wir hier

nur die Entfernungen der drei Himmelskörper voneinander und die Größe der Erde in einer beliebigen Einheit ausgedrückt zu kennen. Der Halbmesser der Erde sei gleich 1, ihre Entfernung von der Sonne r, vom Monde m. Wir würden alsdann durch einfache geometrische Rechnung den Halbmesser des Erdschattens in der Entfernung des Mondes gleich $1+\frac{m}{r}$ erhalten. Das Verhältnis $\frac{m}{r}$ ist nun für unsere beiden Himmelskörper gleich $^1/_{387}$, und um ebensoviel würde also der Durchmesser des Erdschattens in der Entfernung des Mondes größer sein als ein Erddurchmesser. In Wirklichkeit trifft dies durchaus nicht zu. Man kann an der Krümmung der Schattengrenze, die über den Mond bei seinen Verfinsterungen hinzieht, deren Durchmesser, zunächst in Teilen des scheinbaren Monddurchmessers selbst, und damit auch in Teilen des wirklichen Erddurchmessers, leicht finden. Die Beobachtung gibt für den Erdschatten nur etwa drei Viertel des Erddurchmessers, er ist also kleiner, nicht größer als dieser. Dies hat seine durchaus nur geometrische Ursache darin, daß die Sonne ein ausgedehnter leuchtender Körper und größer als die Erde ist. Die obenstehende Zeichnung erklärt dies ohne weiteres. S ist der Durchmesser der Sonne, e der der Erde; r und m haben die Bedeutung wie vorher. Wir betrachten die Strahlen, welche von den beiden äußersten Punkten von S ausgehen und die Erde tangieren. Nur in dem Gebiete hinter der Erde, welches von den beiden Strahlen s und s_1 begrenzt wird, herrscht völlige Dunkelheit; man nennt dieses Gebiet den Kernschatten. Zwischen diesem und den äußersten Begrenzungsstrahlen der Schattenkegel vom oberen und vom unteren Rande der Sonne befindet sich ein Gebiet, in das nicht von allen Punkten der Sonne Strahlen gelangen können; es ist dies das Halbschattengebiet. Eine einfache geometrische Betrachtung zeigt, daß der Halbmesser des Kernschattens in der Entfernung des Mondes gleich $1-\frac{m}{r}(S-1)$ sein muß, wenn man den Halbmesser der Erde wieder zur Einheit nimmt. S ist dann gleich 108, und wir erhalten für den gesuchten Halbmesser des Erdschattens $1-{}^{107}/_{387}$ oder 0,723; das sind nahezu



Kern- und Halbschatten.


Phasen einer Mondfinsternis. Nach W. Meyer, „Das Weltgebäude".

drei Viertel des Erdhalbmessers. Der Durchmesser des Mondes ist 3,66mal kleiner als der der Erde, die kreisförmige Projektion des Kernschattens muß somit auf dem Mond einen um $3{,}66 \times 0{,}723 = 2{,}65$mal größeren Kreis bilden, als die Mondscheibe selbst darstellt. Auf der unteren Abbildung einer Mondfinsternis übersieht man, daß dies der Wirklichkeit entspricht.

Auf dieselbe Weise kann man bei Sonnenfinsternissen den Schattenkegel des Mondes bestimmen, dessen äußerste Spitze nicht immer die Erde erreicht, so daß die Verfinsterung der Sonne in diesem Falle nicht total werden kann, obgleich die Mondscheibe genau zentral vor der der Sonne steht. Es bleibt dann ein schmaler leuchtender Ring um den Mond unbedeckt: die Finsternis ist ringförmig.

Sehr deutlich wird auch die geradlinige Ausbreitung der Lichtstrahlen durch das photographische Bild gezeigt, das in einer sogenannten Lochcamera entsteht (s. die untenstehende Abbildung). Wir haben davon schon in unserer Einleitung (S. 37) gesprochen. Von den von einem beleuchteten Gegenstande nach allen Richtungen ausgehenden Strahlen gelangt von jedem Punkte des Gegenstandes nur einer zu der ihm in einiger Entfernung gegenübergestellten

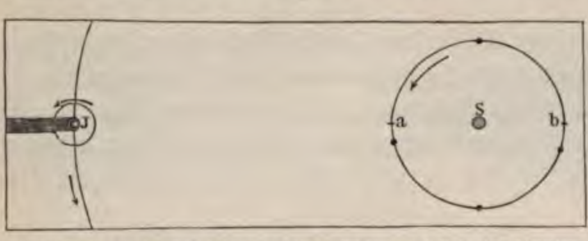


Entstehung eines Bildes in einer Lochcamera.

lochförmigen Öffnung und kann durch diese auf einen dahinter stehenden Schirm fallen. Jedem Punkte des Gegenstandes entspricht also auch ein von ihm in seinem Lichte beleuchteter Punkt des Schirmes, d. h. auf dem Schirm entsteht eine genaue Abbildung des Gegenstandes, und zwar eine umgekehrte, weil ein tieferer Punkt des Objektes den Schirm in einem höher gelegenen Punkte trifft und umgekehrt. Dieses Bild entsteht so in jeder Entfernung vom Loche, nur ändert sich seine Größe mit dieser Entfernung. Ist o die Größe des Objektes, r seine Entfernung vom Loche, r_1 die des Bildes vom letzteren, endlich b die Größe des Bildes, so muß nach geometrischen Gesetzen $o:r = b:r_1$ sein, oder in Worten, es muß sich die Größe des Bildes zum Objekte verhalten wie die Entfernungen beider vom Loch. Jeder Amateurphotograph kann sich mit einfachsten Mitteln von der Richtigkeit dieses Satzes überzeugen.

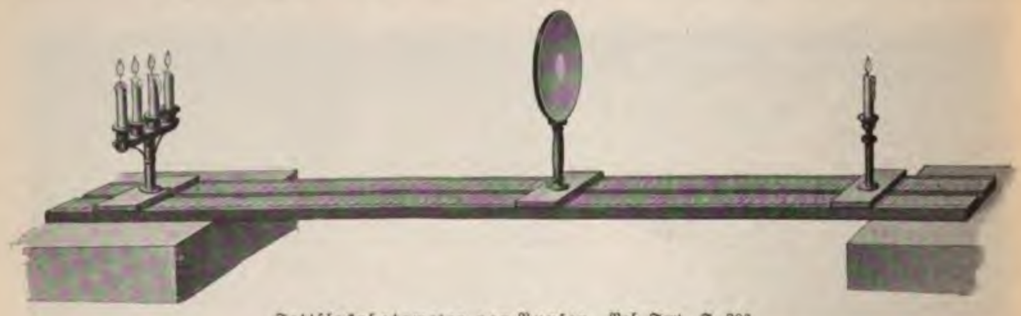
Auch der Schall breitet sich vom tönenden Körper strahlenförmig aus und gebraucht dazu eine gewisse Zeit. Wir müssen voraussetzen, daß dies in gleicher Weise bei dem Lichte der Fall ist, denn jede Naturwirkung muß in irgend einem Verhältnis zur Zeit stehen. Während wir aber beim Schall mit einiger Aufmerksamkeit auch ohne besondere Hilfsmittel für seine Fortpflanzung eine Zeitdauer wahrnehmen, durcheilt das Licht irdische Entfernungen mit einer

scheinbar unendlichen Geschwindigkeit. Erst das Spiel der Lichtstrahlen zwischen den ungeheuern Entfernungen der Himmelskörper ließ seine Geschwindigkeit ermessen. Nicht lange nach der Entdeckung der **Jupitermonde** durch das neu erfundene Fernrohr hatte man bemerkt, daß ihre Umlaufszeiten, die aus ihren Verfinsterungen im Schatten des Jupiter abgeleitet wurden, periodischen Änderungen unterworfen waren, je nachdem sich das System des Jupiter uns näherte oder von uns entfernte (s. die nebenstehende Abbildung). Der Unterschied betrug zwischen der größten und kleinsten Entfernung des Jupiter J von der Erde, in den Punkten a und b, mehr als 1000 Sekunden. Diese Punkte stehen um rund 40 Millionen Meilen auseinander. Jene Verzögerung oder Beschleunigung des Eintrittes der Verfinsterungen konnte nur damit erklärt werden, daß das Licht diese 1000 Sekunden gebrauchte, um den Weg eines Durchmessers der Erdbahn, d. h. jene 40 Millionen Meilen, zu durchlaufen. Das ergibt also für die **Lichtgeschwindigkeit** in der Sekunde 40,000 Meilen oder rund 300,000 km.



Verfinsterung eines Jupitermondes. S Sonne, a b Erdbahn, J Jupiter.

Diese **Lichtzeit**, welche die Strahlen der Himmelskörper verwenden, um bis zu uns zu gelangen, muß bei allen astronomischen Bebachtungen berücksichtigt werden, wenn sich die Entfernungen der Körper von uns im Laufe der Beobachtungsreihen verändern. Das Sonnenlicht braucht etwa 8 Minuten, um zu uns zu gelangen. Für die Venus schwankt die Lichtzeit zwischen 2 und 14 Minuten; auf dem entferntesten Planeten unseres Systems, Neptun, vergehen 4 Stunden und 8 Minuten, bis das Licht der Sonne zu ihm gelangt. Ein Ereignis auf unserem Zentralgestirn, z. B. das plötzliche Auflodern einer Protuberanz, würden also Bewohner des Neptun erst volle 4 Stunden später wahrnehmen als wir. Den Weg zwischen uns und dem nächsten Fixstern unserer Kenntnis, dem ersten Stern in dem südlichen Sternbilde des Centauren, legt das Licht erst in 4½ Jahren zurück; aber es gibt zweifellos viele Sterne


Fettfleckphotometer von Bunsen. Vgl. Text, S. 206.

am Firmament, die in Wirklichkeit schon seit Hunderten von Jahren nicht mehr existieren, während der letzte von ihnen ausgegangene Strahl uns immer noch nicht erreicht hat.

Noch auf einem anderen Wege haben die astronomischen Beobachtungen die Lichtgeschwindigkeit ermittelt. Unsere Betrachtungen auf S. 78 haben uns gezeigt, daß zwei verschiedene Bewegungsursachen, die auf einen Körper wirken, sich nach dem Satz vom Parallelogramm der

Kräfte zu einer einzigen Bewegung verbinden. Das muß auch mit dem Lichte geschehen, das von einem Fixsterne herkommt. Dasselbe findet uns und unser Fernrohr nicht ruhend, denn die Erde besitzt eine sehr beträchtliche Bahngeschwindigkeit bei ihrer Bewegung um die Sonne. Die Richtung, in der wir den Lichtstrahl sehen, ist notwendig eine Resultante aus der Lichtgeschwindigkeit und unserer Bahngeschwindigkeit. Man übersieht leicht, daß infolge der kreisenden Bewegung der Erde die Richtung dieser Resultante sich fortwährend ändern muß, so daß die Fixsterne genau im Laufe eines Jahres, in welchem die Erde ihren Kreislauf vollendet, ihrerseits eine kreisende Bewegung auszuführen scheinen, deren Form von ihrer Lage zur Erdbahn abhängt, während die große Achse der scheinbar durchlaufenen Ellipse für alle Sterne gleich groß ist und zugleich ein direktes Maß für jenes Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit zu der der Erde gibt. Die Erscheinung selbst nennt man die **Aberration der Fixsterne**. Die halbe große Achse jener jährlich durchlaufenen Ellipse fand man gleich 20,492 Bogensekunden. Ist v die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn, G die Lichtgeschwindigkeit, so muß nach dem Parallelogramm der Kräfte zwischen diesen Größen die Relation $v = G \tang \alpha$ gelten, wo α die oben angegebene Aberrationskonstante ist. Führen wir die Rechnung aus, so ergibt sich wieder sehr nahe 300,000 km für die Lichtgeschwindigkeit.



Reflexion des Lichtes an ebenen Spiegeln. Nach M. Meyer, „Das Weltgebäude“. Vgl. Text, S. 207.

Die moderne Experimentierkunst hat es nun auch verstanden, innerhalb irdischer Dimensionen die Fortpflanzungszeit des Lichtes zu bestimmen. Der erste Versuch in dieser Hinsicht wurde von **Foucault** ausgeführt. Im Prinzip beruht seine Methode darauf, daß man den Winkel mißt, den in einem sehr schnell rotierenden Spiegel ein von diesem ausgehender Lichtstrahl mit seinem aus größerer Entfernung reflektierten Bild macht. Diese Ablenkung, verbunden mit der Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels und der Länge des Lichtweges gibt die gesuchte Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Nach einer ähnlichen Methode hat in jüngerer Zeit **Perrotin** auf der Sternwarte zu Nizza die Geschwindigkeit des Lichtes auf einem Wege über mehrere Kilometer hinweg gemessen und immer wieder übereinstimmend dafür nahezu genau 300,000 km in der Sekunde erhalten.

Geht also das Licht strahlenförmig von dem leuchtenden Körper aus, so muß in Bezug auf seine Wirkung in verschiedenen Entfernungen das allgemeine Gesetz der Strahlung gelten, das wir schon bei Gelegenheit der Gravitation abgeleitet haben, d. h. also, es muß die **Lichtstärke**

mit dem **Quadrat der Entfernung abnehmen** (s. S. 105). Um dies experimentell nachzuweisen, muß man zunächst verschiedene Lichtstärken miteinander vergleichen, messen können und einen Maßstab für das Licht vereinbaren, wie wir es für die anderen Naturwirkungen getan haben. Als Einheit der Lichtstärke hat man die Lichtwirkung angenommen, die eine sogenannte **Normalkerze** aus 1 m Entfernung zeigt. Die Normalkerze ist aus reinem Paraffin hergestellt und hat einen Durchmesser von 2 cm, ihre Flamme wird während der Beobachtungen bei einer bestimmten Dochtstärke auf einer Höhe von 5 cm erhalten. Neuerdings hat man ziemlich allgemein statt der Normalkerze die sogenannte **Hefnerlampe** eingeführt, in welcher Amylacetat gebrannt wird. Ihre Flammenhöhe wird auf 4 cm gehalten. Ihre Lichtstärke beträgt 1,2 der einer Normalkerze.


Heliostat. Vgl. Text, S. 208.

Um mit Hilfe solchen Normallichtes Vergleichungen anstellen zu können, muß man sich eines Lichtmessers, eines **Photometers** bedienen. Die einfachste und doch recht gute Resultate gebende derartige Vorrichtung ist das sogenannte **Fettfleck-Photometer von Bunsen** (s. die untere Abbildung, S. 204). Man macht ein Stück weißes Papier durch Benetzen mit Fett an einer Stelle durchsichtiger und sieht, wie diese Stelle bei auffallendem Lichte dunkler als das weiße Papier erscheint, weil hier ein Teil des Lichtes hindurchgeht, nicht von dem Papier zurückgeworfen wird. Bei durchscheinendem Lichte dagegen erscheint der Fleck hell. Auf der einen Seite des Papieres stellt man die Normalkerze in einem Meter Entfernung auf, auf der anderen Seite dagegen das zu messende Licht, dessen Entfernung von dem Papier man verändert, bis der Fettfleck verschwindet. Dann dringt offenbar von beiden Seiten die gleiche Lichtmenge durch. Mit Hilfe eines solchen Photometers findet man, daß man in einer Entfernung von 2 m 4 Normalkerzen aufstellen muß, wenn sie der einen 1 m entfernten das Gleichgewicht der Beleuchtung halten sollen, in 3 m 9 Kerzen, in 4 deren 16 u. s. f. Ist dies Gesetz einmal erkannt, so kann man sich desselben bedienen, um aus der Entfernung einer Lichtquelle von dem Schirme des Photometers, in welcher der Fettfleck verschwindet, seine Lichtstärke in Einheiten der Normalkerze zu finden. Wenn dasselbe 2 m absteht, so hat es die Stärke von 4 Normalkerzen, oder wir haben allgemein die Intensität J einer Lichtquelle, wenn J_0 die der Normalkerze, r_0 und r die zugehörigen Entfernungen vom Schirm sind, $J = J_0 \frac{r^2}{r_0^2}$.

Die moderne Beobachtungskunst erforderte die Herstellung von Photometern anderer und wesentlich komplizierterer Konstruktion, die uns hier nicht weiter beschäftigen können.

Erforschen wir mit Hilfe solcher Instrumente die Gesetze der Lichtwirkung, so begegnen wir überall den gleichen Erscheinungen, wie sie uns beim Schall und auch teilweise bei der

Wärme schon entgegentraten, aber die Gesetze prägen sich, angesichts der größeren Feinheit des Gesichtssinnes, mit wesentlich größerer Deutlichkeit aus.

b) Gesetze der Reflexion.

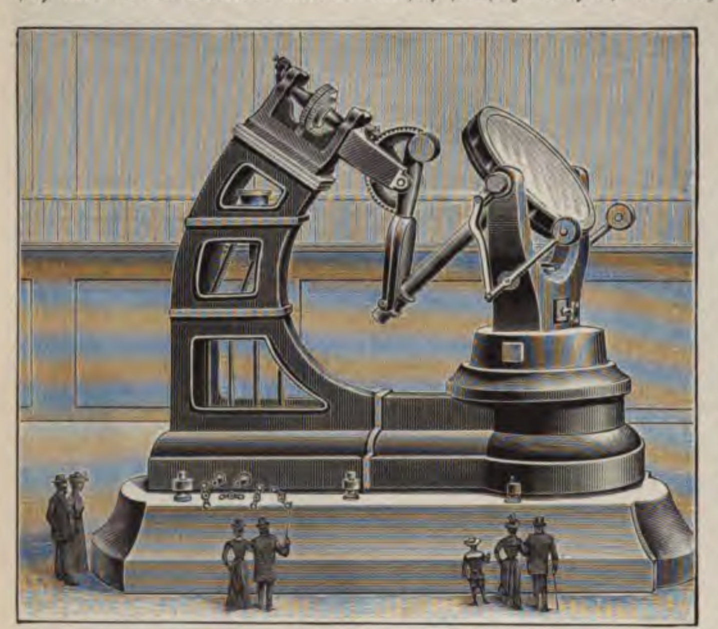
Nahmen wir die Reflexion des Schalles in dem Widerhall des Echos wahr, so sehen wir dieselbe Wirkung beim Licht in dem Spiegelbilde (s. die Abbildung, S. 205). Eine möglichst vollkommen glatte Fläche wirft die Partikelchen, die wir, zunächst bei der veralteten Emissionstheorie bleibend, uns von der Lichtquelle ausgehend denken, genau so zurück, wie die Bande des Billards die Kugel, so daß also der Winkel, unter welchem der Strahl von der



Horizontalliegendes Riesenfernrohr in Paris. Nach Photographie. Vgl. Text, S. 208.

spiegelnden Fläche reflektiert wird, gleich dem Einfallswinkel desselben Strahles ist, nur auf der anderen Seite von der auf den Einfallspunkt gefällten Senkrechten, dem Einfallslot, liegt. Es ist in unserer Abbildung a = b. Senkrecht auffallende Strahlen kommen also auch wieder senkrecht zurück, sie werden in sich selbst reflektiert; Strahlen, die den ebenen Spiegel unter einem sehr spitzen Winkel streifen, fallen auf der anderen Seite wieder ebenso streifend aus. Parallele Strahlen, die auf einen ebenen Spiegel fallen, müssen auch wieder parallel zurückgeworfen werden; deshalb sehen wir die Gegenstände darin in unveränderter Gestalt ebenso, als ob sie sich in der Verlängerung der austretenden Strahlen hinter dem Spiegel befänden: der ebene Spiegel entwirft ein aufrechtes unverändertes Bild, das man ein virtuelles nennt, weil die Strahlen, von welchen es in unserem Auge erzeugt wird, nicht wirklich von dem Ort im Raume herkommen, in welchem wir das Bild hinter dem Spiegel zu sehen glauben.

Die Anwendungen des ebenen Spiegels für wissenschaftliche Zwecke sind sehr mannigfaltig. Wir erwähnen in dieser Hinsicht zunächst den Heliostat. Es ist für viele Experimente erwünscht, einen Strahl des hellsten Lichtes, das uns zu Gebote steht, das der Sonne, in dauernd unveränderlicher Richtung in unsere Apparate einzuführen. Man läßt zu diesem Zweck einen ebenen Spiegel durch ein Uhrwerk dem Wege der Sonne folgen. Diese Aufgabe wird durch die Erwägung, daß die Sonne sich mit dem ganzen Himmelsgewölbe in 24 Stunden einmal um die Erdachse zu drehen scheint, wesentlich erleichtert, indem man den zu benutzenden Sonnenstrahl zunächst in die Richtung der Erdachse durch den bewegten Spiegel lenkt. Stellt man dieser Bedingung entsprechend den Spiegel auf (s. die Abbildung, S. 206), so braucht er sich nur in 24 Stunden einmal um sich selbst zu drehen, wodurch er den Strahl beständig in der Richtung der Erdachse festhalten muß. Ein zweiter, fester ebener Spiegel kann dann dem Strahl eine beliebige andere feste Richtung geben.



Siderostat des Pariser Riesenfernrohrs.

Der Heliostat wird vielfach benutzt, um einen Sonnenstrahl auf weite Entfernungen hinzuwerfen, sei es, daß man auf diese Weise eine Seite der großen Dreiecke bildet, mit denen die Größe der Erde ausgemessen wird, oder daß man zu militärischen Zwecken Lichtsignale austauscht. Eine Anwendung des Heliostaten im allergrößten Stile hat man auf der Pariser Weltausstellung von 1900 bewundern können (s. die Abbildung, S. 207). Da der Apparat die Strahlen aller Gestirne in ein und dieselbe Richtung bringen soll, muß man die Vorrichtung deshalb Siderostat nennen. Man hat dort ein Riesenfernrohr von 60 m Länge erbaut, das aber unveränderlich in horizontaler Lage bleibt, wie es die Abbildung zeigt. Vor seinem Objektiv befindet sich ein großer Spiegel, dem man die beschriebenen Bewegungen erteilen kann, um die Strahlen von jedem beliebigen Punkte des umschwingenden Himmelsgewölbes beständig in das feste Fernrohr zu leiten (s. die obenstehende Abbildung). Eine prinzipiell gleichen Zwecken dienende, wenn auch praktisch sehr verschiedene Vorrichtung hat auch das gleichfalls in Paris zuerst aufgeführte Ellbogen-Equatorial, von dem im folgenden noch die Rede sein wird.

Der ebene Spiegel dient auch bei physikalischen Experimenten häufig als Lichtzeiger. Will man sehr kleine Bewegungen nachweisen, so kann man es oft einrichten, daß der sich bewegende Körper einen Spiegel dreht. Läßt man auf diesen aus einer festen Lichtquelle einen Strahl fallen, so wird der von ihm reflektierte Strahl durch den Spiegel um den doppelten Betrag seiner Drehung aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt. Dieser reflektierte Strahl

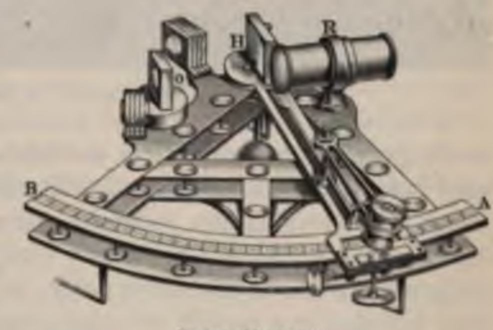
wird nun in größerer Entfernung, z. B. auf eine gegenüberliegende Wand, gerichtet. Damit vergrößert sich, entsprechend der Schenkellänge des Ausfallwinkels, der lineare Wert der Spiegelverschiebung, und die Bewegung kann für das bloße Auge sichtbar werden, wenn der



Lichtzeiger.

Spiegel selbst sich auch nur um eine mikroskopische Größe verschiebt, die man mit Hilfe einer dem austretenden Strahl gegenübergestellten Skala mißt. Bei feineren Messungen dieser Art beobachtet man das Bild der Skala in dem bewegten Spiegel selbst durch ein Fernrohr, wie es schematisch in obenstehender Zeichnung veranschaulicht ist.

Ferner wird der ebene Spiegel auch zu direkten Winkelmessungen, z. B. zu nautischen Zwecken beim Spiegelsextanten, verwendet. Auf einem durch den Namen des Instrumentes bezeichneten, mit einer Gradteilung versehenen Kreisausschnitte AB (s. die untenstehende Abbildung) bewegt sich ein Radius desselben CD, auf dem im Mittelpunkte des Kreises ein ebener Spiegel H angebracht ist. Dieser wirft die Strahlen eines zu beobachtenden Objektes zu einem anderen, nur halb mit der spiegelnden Folie belegten Spiegel O und von diesem in ein Fernrohr R. Durch dieses kann man also zwei in verschiedenen Richtungen befindliche Gegenstände zugleich sehen, den einen durch die Spiegel, den andern direkt, über den zweiten Spiegel hinweg. Will man den Winkel zwischen zwei Gegenständen, z. B. zwischen dem Horizont und der Sonne, messen, so verschiebt man den Radius mit dem beweglichen Spiegel so lange, bis beide sich im Fernrohr decken. Der auf der Gradteilung dann abzulesende Winkel ist doppelt so groß als der gesuchte. Auf dem Lande verwendet man bei solchen Messungen der Sonnenhöhe oder der eines anderen Gestirnes den sogenannten Quecksilberhorizont. Eine Schale mit diesem flüssigen Metalle gefüllt hat eine genau horizontale spiegelnde Fläche. Wenn man das hierin gespiegelte mit dem wirklichen Sonnenbilde zur Deckung bringt, zeigt der Spiegelsextant den vierfachen Winkel der Sonnenhöhe, weil zweimalige Reflexion stattfindet.



Spiegelsextant.

Im folgenden werden wir sehr häufig mit Prismen zu tun haben. Ein Prisma ist ein für Strahlen beliebiger Gattung durchlässiger Körper, der zwei ebene, sich unter einem beliebigen Winkel treffende Flächen hat. Die dritte Fläche verbindet sich mit den beiden anderen im Durchschnitt meist zu einem gleichschenkeligen Dreieck. Bei der optischen Verwendung des Prismas kommt es häufig auf die genaue Kenntnis seiner Winkel an, die uns das Gesetz der Reflektion an ebenen Flächen zu bestimmen erlaubt. Hierfür dient das Reflexionsgoniometer (s. die untenstehende Abbildung). Man befestigt das Prisma in der Mitte eines drehbaren Tischchens, dessen Drehung durch eine Gradteilung gemessen werden kann. Die Kante des Prismas,

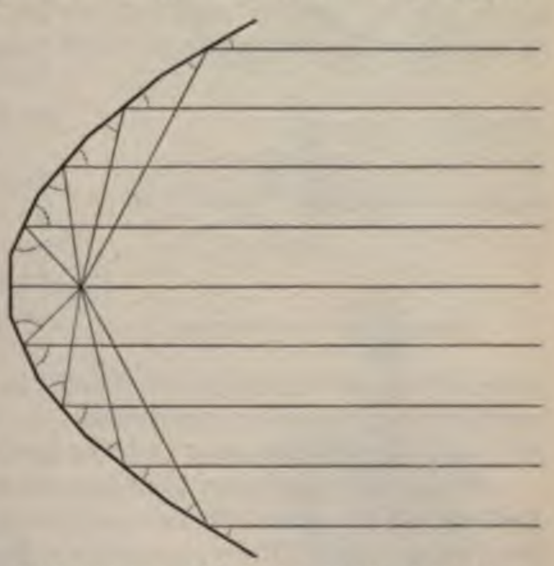


Reflexionsgoniometer zur Messung von Prismenwinkeln.

wo die Hauptflächen unter dem zu ermittelnden Winkel des Prismas zusammenstoßen, steht dabei senkrecht zum Tische, und parallele Strahlen fallen durch einen engen Spalt auf die beiden Seiten, wie in obenstehender Zeichnung angedeutet ist. Dann werden die Strahlen von diesen Seiten reflektiert, und es läßt sich nun geometrisch leicht zeigen, daß die reflektierten beiden Strahlen einen Winkel miteinander bilden, der das Doppelte des gesuchten Prismenwinkels ist. Man beobachtet nun zunächst den ersten reflektierten Strahl durch ein fest angebrachtes Fernrohr und dreht das Prisma, bis der zweite Strahl im Fernrohr dieselbe Stelle einnimmt. Die Hälfte des auf der Teilung des Meßtisches abgelesenen Winkels ist der Prismenwinkel.

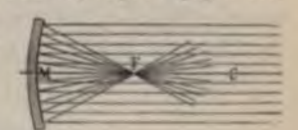
Eine spiegelnde Fläche, die nicht eben ist, wird die Strahlen so reflektieren, als ob die Fläche aus unendlich vielen, unendlich kleinen, ebenen Flächen zusammengesetzt wäre, die unter verschiedenen Winkeln zusammenstoßen (s. die obere Figur, S. 211). Das Reflexionsgesetz

wird auch hier innegehalten; die Ein- und Ausfallswinkel sind von derjenigen Tangente gemessen die gleichen, die man im Einfallspunkte des Strahles an die gekrümmte Fläche ziehen kann. Parallel einfallende Strahlen werden nun aber nicht mehr parallel zurückgeworfen, sondern verfolgen verschiedene Richtungen, die von der Form der Fläche abhängen. Man kann also die rein geometrische Aufgabe stellen, eine Fläche zu finden, von der parallel einfallende Strahlen so reflektiert werden, daß sie in einem bestimmten Punkt alle zusammenkommen, d. h. sich hier durchkreuzen. Die Lösung der Aufgabe ergibt dafür eine **parabolisch gekrümmte Fläche**. Der Punkt, in welchem ein solcher parabolischer **Hohlspiegel** parallel auf ihn fallende Strahlen sammelt, ist der geometrische **Brennpunkt** der Parabel.



Reflexion an parabolisch nebeneinander gestellten ebenen Spiegeln.

In ihrem Scheitel nähert sich die Form einer parabolischen Fläche mehr und mehr der einer Kugel. In der praktischen Optik verwendet man wegen ihrer leichteren Herstellbarkeit fast ausschließlich nur Hohlspiegel mit **kugelförmig gekrümmter Oberfläche**. Diese können die Bedingung, alle Strahlen in einem Punkte zu vereinigen, um so weniger genau erfüllen, je mehr sie gekrümmt sind, d. h. je größer die **Öffnung des Spiegels** gegen den Durchmesser der Kugel ist, von der seine Fläche einen Teil bildet; denn eine parabolische Fläche wird nach ihrem Scheitel hin immer ebener und nähert sich allmählich Kugelflächen mit immer größerem Radius. Soll also ein Hohlspiegel mit einer Kugelfläche der Bedingung, alle Strahlen in einem Punkte zu vereinigen, möglichst gut entsprechen, so müssen wir seine Öffnung möglichst klein, seine **Krümmung** möglichst gering machen. Immer werden die aus den mittleren Teilen eines solchen Spiegels kommenden Strahlen jene Bedingung besser erfüllen als die Randstrahlen. Wir wollen die optischen Eigenschaften eines kugelförmig gekrümmten Hohlspiegels, den wir fortan schlechtweg Hohlspiegel nennen werden, noch näher betrachten. Alle die hier im folgenden ausgesprochenen Gesetze sind rein geometrische Folgerungen aus dem fundamentalen Reflexionsgesetze, deren nähere Beweisführung wir uns deshalb erlassen.



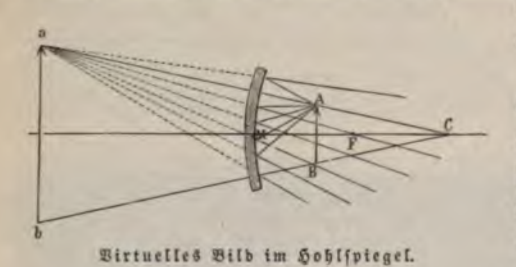
Strahlengang in einem Hohlspiegel. Vgl. Text, S. 212.



Bilderzeugung in einem Hohlspiegel. Vgl. Text, S. 212.

Den tiefsten Punkt eines Hohlspiegels, der gleichweit von allen Punkten seiner kreisförmig begrenzten Öffnung absteht, nennen wir den **Scheitel-** oder **Mittelpunkt** des Spiegels M, und ein Strahl, der diesen Mittelpunkt lotrecht trifft, ist ein **Zentralstrahl** MFC. Wir markieren auf diesem den

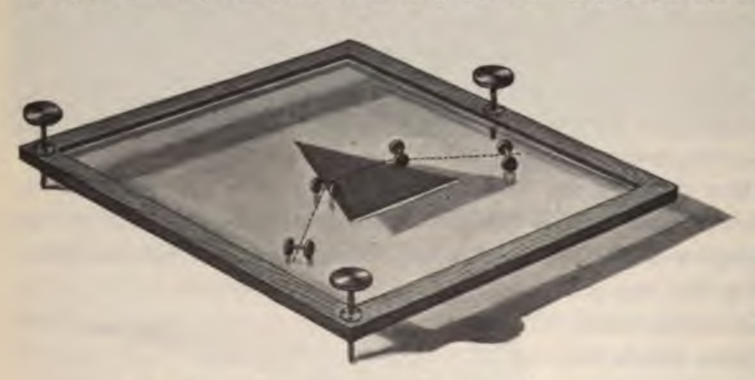
Krümmungsmittelpunkt des Spiegels C, d. h. den Mittelpunkt der Kugel, der seine Oberfläche angehört. Dann läßt es sich zeigen, daß der Punkt, in welchem der Spiegel alle parallel auf ihn fallenden Strahlen konzentriert, also sein Brennpunkt F, in der Mitte zwischen dem Mittelpunkte des Spiegels und seinem Krümmungsmittelpunkt auf dem Zentralstrahl liegt. Die Entfernung FM nennen wir die Brennweite des Spiegels (s. die mittlere Abbildung, S. 211).



Virtuelles Bild im Hohlspiegel.

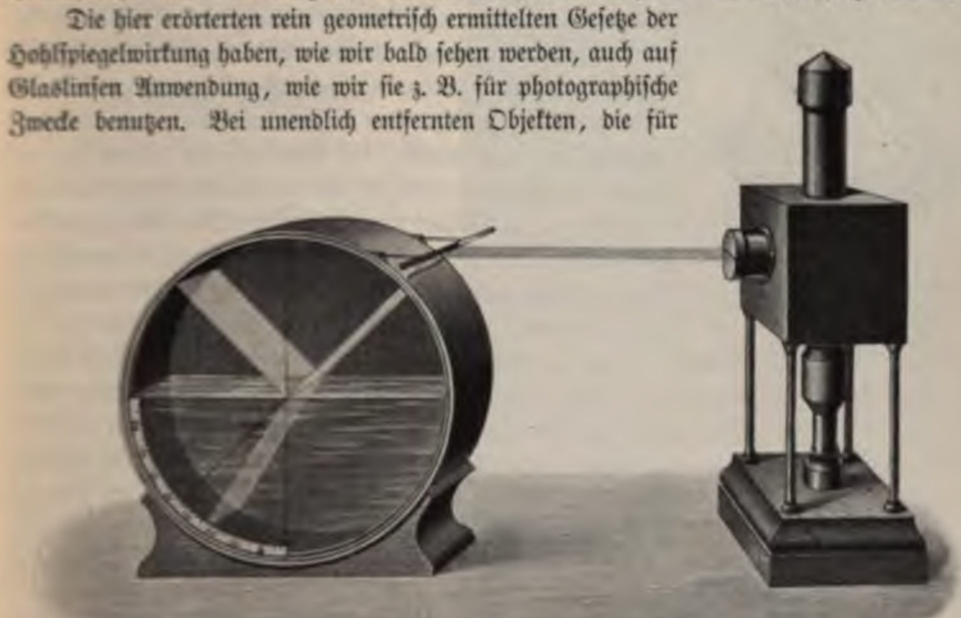
Kommen von einem nicht unendlich fernen Punkte des Zentralstrahles Strahlen, die also den Spiegel divergierend erreichen, so werden diese gleichfalls in einem Punkte konzentriert, der wieder im Zentralstrahl, aber vom Spiegel weiter entfernt als der Brennpunkt liegt. Ist f die Entfernung des Brennpunktes vom Scheitelpunkte, also auf unserer Figur gleich der Strecke FM, p die Entfernung des leuchtenden Punktes von M, endlich p_1 die des Vereinigungspunktes der reflektierten Strahlen von M, so ergibt sich, daß $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p_1}$ ist. Man nennt die beiden Punkte p und p_1 konjugierte Punkte.

Befindet sich ein leuchtender Punkt unterhalb des Zentralstrahles, so liegt sein konjugierter Punkt oberhalb des letzteren. Von einem ausgedehnten Gegenstande AB entwirft also ein Hohlspiegel ein umgekehrtes Bild ba, das in seinem Brennpunkte liegt, wenn der Gegenstand unendlich weit entfernt ist (s. die untere Abbildung, S. 211). Im anderen Falle befindet sich das Bild einem außerhalb der Brennweite stehenden Auge in dem Verhältnis näher, d. h. also vom Spiegel entfernter, als es der oben gegebenen Formel entspricht. Rückt das Objekt selbst in den Brennpunkt, so wird das Glied $\frac{1}{p_1} = 0$ und p_1 unendlich groß; das Bild entsteht erst in unendlicher Entfernung, die reflektierten Strahlen werden parallel zueinander. Nähern wir nun das Objekt noch weiter dem Spiegel, so daß es zwischen M und F zu stehen kommt, wie in der obenstehenden Abbildung, so divergieren die austretenden Strahlen. Das Auge verlängert sie scheinbar nach rückwärts, wo sie hinter dem Hohlspiegel ähnlich wie bei einem ebenen Spiegel sich zu einem virtuellen Bilde vereinigen, im Gegensatze zu den Bildern, die wir bisher bei Hohlspiegeln betrachtet haben, die durch wirklich sich im Bildpunkte vereinigende Strahlen entstehen und deshalb reelle Bilder genannt werden. Diese letzteren scheinen für unser Auge frei in der Luft greifbar vor dem Spiegel zu schweben und sind deshalb zu allerlei optischen Spielereien verwendet worden. Die Größe dieses umgekehrten reellen Bildes eines Hohlspiegels verhält sich zu der des Objektes selbst wie die Entfernung dieser beiden konjugierten Punkte vom Spiegel. Ist o die Größe des Objektes, b die des Bildes, so haben wir $\frac{b}{o} = \frac{p_1}{p}$. Soll das Bild


Experiment der Lichtbrechung. Vgl. Text, S. 216.

ebenso groß werden wie das Objekt, so müssen wir $p_1 = p$ machen. Dann folgt aus der weiter oben gegebenen Relation zwischen den konjugierten Punkten und dem Brennpunkte, daß die Entfernung vom Spiegel gleich der doppelten Brennweite sein muß und sich das Objekt im Krümmungsmittelpunkte C des Spiegels befindet. Nun rücken wir das Objekt von hier aus dem Brennpunkt noch näher und sehen, wie das Bild jenseits des Objektes entsteht, weiter vom Spiegel entfernt und vergrößert wird, bis es, wie oben schon erwähnt, sich in der Unendlichkeit verliert, wenn sich das Objekt im Brennpunkte selbst befindet. Das virtuelle Bild, welches dann bei noch größerer Annäherung des Objektes hinter dem Spiegel erscheint, ist aufrecht und stets vergrößert. Wir machen davon z. B. beim Rasierspiegel Gebrauch.

Die hier erörterten rein geometrisch ermittelten Gesetze der Hohlspiegelwirkung haben, wie wir bald sehen werden, auch auf Glaslinsen Anwendung, wie wir sie z. B. für photographische Zwecke benutzen. Bei unendlich entfernten Objekten, die für



Tyndalls Brechungsapparat. Vgl. Text, S. 218.

photographische Apparate praktisch nur einige Zehner von Metern abzustehen brauchen, entsteht das Bild im Brennpunkte (Focus). Nähere Gegenstände bleiben bei dieser Einstellung unscharf; man muß die Camera weiter ausziehen und zwar in dem oben angegebenen Verhältnis, um von ihnen ein scharfes Bild zu erhalten, wobei aber wieder die ferner liegenden Objekte undeutlich werden. Will man mit dem Apparat Vergrößerungen machen, so muß man das zu vergrößernde Bild zwischen dem Krümmungsmittelpunkt und dem Fokus der Linse aufstellen und die Camera sehr weit ausziehen.

Um verschieden entfernte Objekte zugleich möglichst scharf abzubilden, blendet man das Objektiv ab, d. h. man macht seine Öffnung kleiner und nähert dadurch seine Wirkung der einer Lochcamera, welche ja die Objekte aus allen Entfernungen gleich scharf zeichnet. Das Abblenden geschieht immer konzentrisch vom Rande zur Mitte hin, wodurch die Randstrahlen mehr und mehr abgehalten werden. Wir wissen, daß die gewöhnlichen Hohlspiegel (und dasselbe gilt für die Linsen) wegen ihrer Abweichung von der parabolischen Form diese Strahlen nicht in demselben Fokus sammeln wie die Strahlen aus den mittleren Teilen des Spiegels, ein

Fehler, der bei allen angewandten optischen Systemen entsteht und den wir die sphärische Abweichung nennen. Da diese durch das Abblenden vermindert wird, erhöhen wir auch noch die Schärfe des Bildes. Die Größe der Abbildung eines fernen Objektes wächst mit der Brennweite des optischen Systems, diese wieder mit dem Krümmungsradius der wirksamen Fläche. Je flacher ein Hohlspiegel oder eine Linse ist, um so größer ist auch das von ihnen entworfene Fokusbild. Um eine Camera handlich zu machen, muß man oft kleine Brennweiten wählen. Da diese das Bild sehr stark verkleinern, kann eine Platte von bestimmter Größe mehr abbilden, als wenn die Brennweite größer wäre: sie hat einen größeren Bildwinkel. Bei kleinerer Brennweite ist aber die Krümmung der optischen Fläche bei linear genommen gleichgroßer Öffnung des Spiegels oder der Linse größer. Von dieser aber hängt, wie wir gleich noch näher sehen werden, die Lichtstärke des Bildes ab; mit der Abweichung des Spiegels von der parabolischen Form muß zugleich auch der Fehler seiner sphärischen Abweichung wachsen. Die Schärfe des Bildes nimmt deshalb von der Mitte zum Rande hin in immer höherem Maß ab, je kleiner die Brennweite ist. Objektive mit größeren Brennweiten geben (abgesehen von den Kunstgriffen, die zur Vermeidung dieses Fehlers angewendet werden) gleichmäßiger durchgezeichnete Bilder, bei gleicher Lichtstärke. Freilich kommt den kleineren Fokusbildern in dieser Hinsicht wieder der Umstand zu statten, daß für sie die Einstellung für verschieden entfernte Objekte weniger wechselt als bei großen Brennweiten. Will man für photographische Aufnahmen schnell bei der Hand sein und also jede Einstellung vermeiden, so muß man ein Objektiv mit möglichst kurzer Brennweite verwenden, das dann allerdings auch nur kleine Bilder gibt.



Scheinbare Knickung eines Stabes durch Lichtbrechung im Wasser. Vgl. Text, S. 218.

Die Lichtstärke des Bildes hängt offenbar sowohl von der Brennweite wie von der Öffnung des Spiegels, bez. Linse ab. Je weiter derselbe geöffnet ist, desto mehr Strahlen kann er vom Objekt aufnehmen, um sie in dem Fokusbilde wieder zu vereinigen, und je mehr er dieses Bild verkleinert, je kürzer also seine Brennweite ist, desto mehr drängt er hier die Strahlen zusammen, und desto heller muß das Bild erscheinen. Die Lichtstärke des Bildes bemißt sich demnach nach dem Verhältnis der Brennweite zur Öffnung, sie ist bei einem Spiegel von 1 cm Öffnung und 10 cm Brennweite genau so groß wie bei einem anderen von 10 cm Öffnung und 100 cm Brennweite. Dieses Verhältnis gilt indes nur für unendlich ferne Objekte, nähere Gegenstände werden ja von demselben Objektiv weniger verkleinert, und ihre Lichtstärke ist geringer. Für nahe Objekte muß man bei gleicher Öffnung länger exponieren als für ferne. Bei Verkleinerung der Öffnung auf die Hälfte nimmt die Lichtstärke um das Vierfache ab, weil die Fläche



Scheinbare Hebung eines Gegenstandes im Wasser durch Lichtbrechung. Vgl. Text, S. 218.

der Öffnung, durch welche die Lichtstrahlen dringen, mit dem Quadrat ihres Durchmessers wächst. Will man ein möglichst großes Bild von größter Lichtstärke erhalten, wie es bei astronomischen Fernrohren erwünscht ist, für die die Lichtstärke des Objektes gegeben ist, so muß man eine große Öffnung mit großer Brennweite verbinden. Daher rührt die Notwendigkeit der großen Dimensionen der astronomischen Sehwerkzeuge. Kommt es aber hauptsächlich nur auf Lichtstärke an, wie bei vielen himmelsphotographischen Untersuchungen, so kombiniert man eine große Öffnung mit kleiner Brennweite. Es gibt solche Instrumente, bei denen das Verhältnis der Brennweite zur Öffnung 1:2,5 ist, jedoch zeichnen diese nur ein scharfes Bild in der Nähe der Bildmitte. Bei den modernen photographischen Objekten erreicht dies Verhältnis Werte von etwa 1:6.



Durch Strahlenbrechung elliptisch erscheinende Sonnenscheibe. Momentaufnahme nach der Natur. Vgl. Text, S. 218.

c) Strahlenbrechung.

Alle die bisher gemachten Wahrnehmungen konnten durch die Annahme einer geradlinig strahlenförmigen Ausbreitung des Lichtes allein erklärt werden, doch machen wir noch andere Wahrnehmungen, die weitere Voraussetzungen über die Natur des Lichtes verlangen. Dazu gehört die Brechung des Lichtes bei seinem Übergange zwischen verschieden dichten Mitteln.

Wir sehen, daß die verschiedenen Körper sich in Bezug auf das sie bestrahlende Licht sehr verschieden verhalten. Glatte Körper, wie Spiegel, werfen es fast vollständig zurück, doch zeigt es sich, daß auch sie etwas davon verschlucken, absorbieren. Vollkommen schwarze Körper geben gar kein Licht zurück; es verschwindet scheinbar schon an ihrer Oberfläche vollkommen. Weiße Körper, wie Gips, Kreide &c., geben das auffallende Licht zwar wieder zurück, aber ohne eine bevorzugte Strahlenrichtung; sie reflektieren auch das nur aus einer Richtung kommende Licht nach allen Seiten hin. Diese Eigenschaft nennt man diffuse Reflexion. Wir können uns diese Eigenschaft leicht dadurch erklären, daß die Oberflächen der betreffenden Körper für das Licht sehr rauh sind, d. h. nach allen Richtungen hin viele kleine Flächen haben, die das Licht auch überallhin reflektieren. Beim Schalle nimmt man ja bekanntlich ganz ähnliche Erscheinungen wahr. Will man, daß in einem Konzertlokal keine besonderen Schallreflexionen stattfinden, so muß man seinen Wänden rauhe Flächen geben, allerdings darf man darin nicht so weit gehen, daß man sie etwa mit Tuch beschlägt, da dieses den Schall absorbiert wie eine schwarze Fläche das Licht.

Ferner gibt es Körper, die scheinbar ein ganz anderes Licht zurückwerfen, als auf sie gefallen ist, das sind die farbigen Körper. Später werden wir erst eine Erklärung dafür suchen

können. Endlich kennen wir durchsichtige Körper, die das weiße oder farbige Licht durchlassen; mit deren optischen Eigenschaften wollen wir uns zunächst befassen.

Es zeigt sich, daß es keinen völlig durchsichtigen Körper gibt. Selbst die reinste Luft absorbiert eine gewisse Menge von Licht. Von den senkrecht durch unsere Atmosphäre dringenden Sonnenstrahlen, die also den kleinsten Weg in der Luft zurücklegen, wird etwa ein Drittel ihres Lichtes verschluckt, ehe es zur Erdoberfläche gelangt. Wieviel Sonnenlicht aber für uns verloren geht, wenn das Tagesgestirn sich dem Horizonte zuneigt, seine Strahlen also die atmosphärische Hülle auf einem sehr viel längeren Wege durcheilen müssen, als wenn sie vom Zenit kommen, weiß jedermann, der beim Sonnenuntergange der sonst übermäßig blendenden Sonne direkt ins Auge schauen konnte. Das kristallklarste Wasser färbt sich in meterlangen Röhren blau und wird in einer Schicht von wenig hundert Metern völlig undurchsichtig, wie Untersuchungen in betreffenden Meerestiefen erwiesen haben. Selbst der scheinbar leere Weltraum, den die Lichtstrahlen von den fernsten Sternen durchdringen, muß eine gewisse Menge Licht absorbieren. Es wäre auch zu verwundern und nach unseren allgemeinen Anschauungen vom Naturgeschehen, selbst soweit wir sie in diesem Werke bis jetzt gewonnen haben, geradezu unmöglich, wenn das Licht, das, wie alle Naturwirkung, auf einer Bewegung beruhen muß, an den Materieansammlungen der Körper, die es durchdringt, keinerlei Widerstand fände, der seine Bewegung beeinflußt. Auch der Schall fand in den verschiedenen Medien verschiedene Widerstände und bewegte sich deshalb in ihnen mit wechselnder Geschwindigkeit. Das muß auch mit dem Lichte der Fall sein. Es ist indes bei der ungeheuern Geschwindigkeit des Lichtes nicht mehr möglich, Unterschiede derselben experimentell nachzuweisen. Nur beim Wasser ist dies gelungen, in welchem sich das Licht in der Tat langsamer fortpflanzt als in der Luft.



Wirkung der Refraktion oder atmosphärischen Strahlenbrechung. × scheinbarer, • wahrer Ort eines Sternes; E Erde. Vgl. Text, S. 219.

Dieser Widerstand wird sich indes noch auf eine andere Weise zu erkennen geben, wenn der durchdringende Lichtstrahl in irgend einer Art zusammengesetzt ist, also nicht bloß, wie wir bisher annahmen, aus einem Strome geradlinig aufstoßender Atome besteht, die gegenseitig in keinem anderen Zusammenhange stehen, als daß sie von der Lichtquelle strahlenförmig ausgingen. Wir wollen dies an einem augenfälligen Experiment erläutern. Zwei Papierscheibchen verbinden wir durch einen kleinen Stift so, daß sie wie zwei kleine Wagenräder auf einer Achse sich bewegen können. Diese lassen wir nun auf einer etwas geneigten Glasfläche laufen, die teilweise, etwa wie in der Zeichnung S. 212 angegeben, rauh gemacht ist. Die rauhe Fläche ist von der glatten durch gerade Linien begrenzt, die etwa ein Dreieck bilden mögen. Rollt unser Wägelchen in senkrechter Richtung gegen die Grenzlinie hin, so wird sich bei ihrer Überschreitung nur seine Geschwindigkeit verringern, nicht auch seine Richtung. Ist die ursprüngliche Richtung auf der glatten Fläche indes gegen die Grenzlinie geneigt, so wird offenbar beim Überschreiten die Achse zwischen den Rädern eine Wendung machen, weil das eine Rädchen die Grenzlinie früher trifft als das andere und also früher die geringere Geschwindigkeit annehmen muß. Sobald aber beide verbundenen Räder vollständig in das rauhe Gebiet eingedrungen sind, setzen sie die veränderte Richtung geradlinig weiter fort. Nennen wir den Winkel, welchen

die Bewegungsrichtung auf der glatten Fläche mit dem Lot auf den Einfallspunkt gegen die Grenzlinie macht, den **Einfallswinkel**, so muß offenbar die Richtung auf der rauhen Fläche immer in dem Sinne geändert werden, daß sie der Verlängerung des Einfallslotes näher rückt. Das Umgekehrte findet statt, wenn die Bewegung von der mehr Widerstand bietenden Fläche auf die glattere übergeht. Die Größe der Ablenkung hängt von der Größe des Einfallswinkels ab, sie ist gleich Null, wenn auch dieser Winkel gleich Null ist, dagegen ein Maximum, wenn der Einfallswinkel 90° wird, das Wägelchen sich also parallel mit der Grenzlinie halb auf der einen, halb auf der anderen Seite bewegt. Die Größe der **Ablenkung wächst proportional dem Sinus des Einfallswinkels** a. Wir sehen auch unmittelbar ein, daß bei verschieden rauhen Flächen die Ablenkung für gleiche Einfallswinkel mit der Größe des Widerstandsunterschiedes zwischen der glatteren und der rauhen Fläche wachsen muß und können einen konstanten Faktor n hierfür durch die Beobachtung ausfindig machen, woraus wir erkennen, daß die Ablenkung ganz allgemein gleich n sin a ist. Den Widerstand der ersten, glatten Fläche vernachlässigen wir dabei zunächst. Endlich wird die Ablenkung auch noch von der Entfernung der beiden Rädchen, von der Größe ihrer Achse abhängen. Ein einzelnes Rädchen würde gar keine Ablenkung erfahren, sondern nur seine Geschwindigkeit ändern, die Ablenkung wächst also mit dem Abstande der Rädchen voneinander. Hätten wir eine Reihe von Radpaaren mit verschieden langen Achsen in gleicher Richtung gegen die Grenzlinie hinrollen lassen, so würden sie nach Überschreitung derselben keine gleichen Richtungen mehr besitzen, sondern derart voneinander divergieren, daß die Radpaare mit kurzen Achsen von der Verlängerung des Einfallslotes weiter entfernt bleiben, weniger abgelenkt werden als die mit langen Achsen.



Refraktion des Lichtes in Materie ungleicher Dichte. Vgl. Text, S. 219.



Durch abnorme Strahlenbrechung verzerrte Sonnenbilder am Horizont.
Nach photographischen Aufnahmen der Lickternwarte. Vgl. Text, S. 219.

Vollkommen gleiche Wahrnehmungen machen wir nun auch am Lichte. Wir lassen einen Lichtstrahl auf eine Wasserfläche fallen und bemerken an dieser eine Ablenkung nach untenhin, eine Brechung, und der Brechungswinkel folgt genau dem oben gegebenen Sinusgesetze. Den Faktor n nennen wir das **Brechungsverhältnis**. Dasselbe ist z. B. von Luft zu Wasser

etwa 4:3. Durch eine Vorrichtung, wie sie die Zeichnung S. 213 veranschaulicht, kann man sich ungefähr von der Richtigkeit der soeben ausgesprochenen Gesetzlichkeiten überzeugen. Ein durch zwei kreisförmige parallele Scheiben abgegrenztes Gefäß ist zur Hälfte mit Wasser gefüllt, und an dem Rande der einen Scheibe ist eine Kreisteilung angebracht, so daß man den Einfallswinkel eines zentral auf die Wasserfläche geleiteten Strahles ablesen kann; ebenso ist der Brechungswinkel auf der unteren, im Wasser befindlichen Teilung abzulesen.

Die Erscheinungen der Lichtbrechung nehmen wir täglich wahr. Ein gerader Stab, den wir schräg in Wasser tauchen, erscheint an der Wasserfläche geknickt (s. die obere Abbildung, S. 214).



Luftspiegelung. Vgl. Text, S. 219.

a direkter Strahl vom Objekt A zum Beobachtungsort O; b durch abnorme Strahlenbrechung gekrümmter Strahl, der das Objekt scheinbar bis B hebt; c abnorm gekrümmter und zugleich an einer Luftschicht WW reflektierter Strahl, der das Objekt umgekehrt in C erscheinen läßt.

Ein auf den Boden eines Gefäßes gelegter Gegenstand, der am Rande des Gefäßes für eine schräge Blickrichtung bereits verdeckt ist, wird doch über dem Rande wieder sichtbar, wenn man das Gefäß mit Wasser füllt (s. die untere Abbildung, S. 214). Auch die Sonne erfährt eine solche scheinbare Hebung durch die sogenannte atmosphärische Strahlenbrechung oder Refraktion. Die Sonnenstrahlen müssen ja auch bei ihrem Übergang aus dem leeren Raum in unsere Lufthülle eine Ablenkung erfahren, die um so größer wird, je schräger die Strahlen sie durchdringen, je mehr sich also die Sonne dem Horizonte nähert; und mit dem Lichte der übrigen Gestirne muß offenbar dasselbe geschehen. Die Sonne scheint infolge dieser Lichtbrechung bereits völlig über dem Horizonte zu sein, während sie sich in Wirklichkeit noch unter demselben befindet. Die Länge des leuchtenden Tages wird dadurch in unseren Breiten um etwa fünf Minuten verlängert, auch wird bewirkt, daß die Sonnenscheibe, wenn sie am Horizonte steht, gegen diesen elliptisch zusammengedrückt erscheint, was z. B. deutlich auf der Momentaufnahme der untergehenden Sonne (s. die Abbildung, S. 215) zu erkennen ist.

Die Brechung eines Lichtstrahles in unserer Atmosphäre geht indes nicht so einfach vor sich, wie wir es bisher beim Übergange zwischen verschiedenen Medien beobachten. Die Dichtigkeit und die Temperatur der Luftschichten nimmt nach obenhin beträchtlich ab, und mit beiden verändert sich das Brechungsvermögen. Die Brechung eines Lichtstrahles geschieht deshalb

so, als ob er bei seinem Tieferdringen in immer andere Medien überginge: er wird nicht einmal, sondern fortwährend gebrochen und beschreibt deshalb eine krumme Linie, wie es in der Abbildung, S. 216, angedeutet ist. Für den Beobachter erscheint das Gestirn in der Richtung der Tangente, die an das letzte Ende der Brechungskurve gezogen ist, das in unser Auge gelangt. Der Wert der atmosphärischen Strahlenbrechung muß deshalb zur Ermittelung der wahren Richtungen, in denen sich die Gestirne befinden, möglichst genau berücksichtigt werden, was indes mit großen Schwierigkeiten verbunden ist, weil man den jeweiligen Temperaturzustand aller der Schichten, die ein betrachteter Lichtstrahl durchdringt, nicht genau kennt. Man muß ein allgemeines Gesetz für die Temperaturabnahme annehmen. Beobachtungen auf Höhenstationen und in Luftballons haben aber ergeben, daß abnorme Temperaturverhältnisse in den höheren Luftschichten gar nicht so selten sind, als man vermuten sollte. Dieselben können erhebliche Fehler in diejenigen astronomischen Messungen bringen, die in der Nähe des Horizontes angestellt werden müssen. In je größeren Höhenwinkeln über dem Horizonte man indes die Messungen vornimmt, je weniger hat man diesen Fehler zu befürchten, da die Strahlenbrechung im Zenit ja verschwindet, entsprechend dem oben gegebenen Brechungsgesetze.

Auf künstlichem Wege kann man, wie aus der oberen Abbildung, S. 217, zu ersehen, einen krummen Lichtstrahl in einer Flüssigkeit darstellen, deren Dichtigkeit von oben nach unten



Wasserspiegelung. Vgl. Text, S. 220.

stark zunimmt. Abnorme Brechungen geben sich auch häufig durch völlig verzerrte Gestalt der untergehenden Sonne (s. die untere Abbildung, S. 217) und die sogenannten Erscheinungen der **Fata Morgana** zu erkennen. Auch das Alpenglühen verdankt wahrscheinlich der gleichen Ursache sein Entstehen. Durch besondere Erwärmung oder Abkühlung lokalisierter Gebiete der unteren Luftschichten können diese ein gleichmäßig über eine gewisse Strecke hin verteiltes abnormes Brechungsvermögen erhalten, durch welches Landgebiete, die Türme und Kuppeln von Städten, über dem Horizont oft sogar völlig in der Luft schwebend erscheinen, die unter normalen Verhältnissen längst unter der Krümmung der Erdoberfläche verschwinden. Gelegentlich spiegeln sich auch Lichtstrahlen an zufällig schärfer voneinander abgegrenzten Luftschichten derart, daß uns die Bilder ferner Objekte auf dem Kopfe stehend erscheinen. Diese Verhältnisse sind

durch unsere Abbildungen, S. 218 und S. 219, veranschaulicht. Die Luftspiegelungsgewässer in der Wüste (s. die beigeheftete Farbentafel) verdanken gleichfalls solchen Reflexionen an der Grenze sehr verschieden erwärmter Luftschichten ihre Entstehung. In den Polarregionen, wo am häufigsten extreme Temperaturverhältnisse dicht nebeneinander angetroffen werden, hat man namentlich solche Erscheinungen wahrgenommen; es ist dann oft das umgekehrte Spiegelbild eines Schiffes zugleich mit dem wirklichen als Seegesicht gesehen worden, wie es nebenstehende Zeichnung darstellt. Das Alpenglühen, eine viel seltenere Erscheinung, als es der Reisende glaubt, der meist ein gewöhnliches, etwas stärker hervortretendes Abendrot dafür hält, tritt immer erst nach diesem auf, wenn die Bergspitzen vorher schon in das abendliche Graublau getaucht waren. Ungewöhnliche Refraktionen, vielleicht durch erhitzte, in ausgedehnten Tälern festliegende Luft hervorgerufen, müssen hier offenbar die Dämmerungsstrahlen noch einmal soweit heben, daß sie aufs neue die Bergspitzen röten. Da dies zu einer Zeit stattfindet, wo die allgemeine Dämmerung schon wesentlich weiter vorgeschritten ist als beim gewöhnlichen Abendrot, tritt die Erscheinung des Alpenglühens um so eindrucksvoller hervor.



Seegesicht.

Wir haben vorhin gesehen, daß die Lichtstrahlen durch die Atmosphäre einen gekrümmten Weg zurücklegen. Auf irgend einem anderen Weltkörper können wir uns nun Verhältnisse vorstellen, bei denen diese Krümmung gerade so groß wird wie die Krümmung seiner Oberfläche. Dann gelangen die Lichtstrahlen aus gewissen Schichten der Atmosphäre gar nicht wieder heraus: sie kreisen beständig um den Weltkörper herum. Es ist nun unter bestimmten Voraussetzungen berechnet worden, daß eine Anzahl aus dem Inneren der Sonne kommender Lichtstrahlen in solche Kreisbahnen gezwungen werden müssen, die noch im Sonnenkörper selbst liegen. Diese Gebiete des ungeheuern Gasballes erscheinen durch das sich hier fangende und teilweise wieder diffus nach allen Seiten ausstrahlende Licht ganz besonders hell und machen deshalb den Eindruck einer gewissen materiellen Abgrenzung, die jedoch in Wirklichkeit gar nicht vorhanden zu sein braucht. Die Sonne kann eine ganz allmählich sich in den Raum verlierende Ansammlung von Gasmassen sein, ein nur besonders dichter und hell leuchtender Nebelfleck, wie wir deren Hunderte am Himmel sehen, während ihre für uns scharf abgegrenzt erscheinende Oberfläche, die in uns den Eindruck des Festen, Körperlichen erweckt, nur ein optisches Phänomen ist. (S. des Verfassers „Weltgebäude“, S. 310.)



Brechung in planparallelen Schichten. Vgl. Text, S. 221.

Auf jeden Fall zeigt diese Betrachtung, daß auch auf dem Gebiete des Lichtes durch eine Summe von geradlinigen Wirkungen eine kreisende Bewegung entstehen kann, wie wir sie in größtem Maßstab in den Bahnbewegungen der Planeten uns durch die ebenfalls geradlinigen Stöße der freien Ätheratome hervorgebracht dachten. Wir geben hierunter eine kleine Tafel der atmosphärischen Refraktion für verschiedene Zenitabstände, zugleich mit ihrer Veränderung für die Temperatur der Luft an der Erdoberfläche und den Luftdruck.



Refraktionstafel.

Zenitdistanz α			Barometer	β	Temperatur	γ
0°	0′	0″	700 mm	0,069	−10°	−0,073
10°		10,2	710 "	0,055	0	−0,034
20		21,0	720 "	0,042	+10	+0,002
30		33,3	730 "	0,029	+20	+0,036
40		48,4	740 "	0,015	+30	+0,068
50	1′	8,7				
60	1	39,7				
70	2	37,3				
75	3	32,1				
80	5	16,2				
85	9	46,5				
90	34	54,1				

Die Refraktion ist
$r = \alpha(1 - \beta - \gamma)$.

Wir müssen uns nun mit den besonderen Eigenschaften der Lichtbrechung weiter beschäftigen, da auf ihnen die Konstruktion fast aller optischen Werkzeuge beruht, die allen Zweigen der Naturwissenschaften so außerordentlich wichtige Dienste geleistet haben.

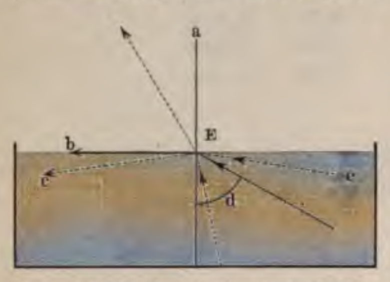
Zunächst zeigt eine einfache geometrische Betrachtung, daß ein Lichtstrahl, der nach Durchdringung einer brechenden Schicht von parallelen Begrenzungsflächen in sein ursprüngliches Medium zurückkehrt, keinerlei Ablenkung erfahren kann. In welcher Richtung auch das Licht eine beliebig dicke planparallele Glasplatte durchdringt, es wird immer parallel zu seiner Einfallsrichtung die Platte wieder verlassen, wenn sie zu beiden Seiten von Luft unter gleichen Druck- und Temperaturverhältnissen umgeben ist. Von der unteren Zeichnung auf S. 220 kann man diese Notwendigkeit unmittelbar ablesen. Das Gleiche muß auch geschehen, wenn der Lichtstrahl mehrere Medien von verschiedener Dichte durcheilt, ehe er zu dem ursprünglichen Medium zurückkehrt. Befindet sich über einer planparallelen horizontal stehenden Glasplatte eine Wasserschicht, auf die wir aus geneigter Richtung einen Strahl leiten, so wird derselbe erst an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser, dann an der zwischen Wasser und Glas und endlich zwischen Glas und Luft stets in verschiedener Weise gebrochen; dennoch bleibt der unten aus dem Glas austretende Strahl mit dem oben in das Wasser eindringenden parallel.

Die Sache ändert sich natürlich, sobald die Begrenzungsflächen der verschieden brechenden Substanzen nicht parallel zueinander sind. Zwei unter einem Winkel zusammenstoßende ebene Flächen bilden ein **Prisma**. Bei einer durchsichtigen Substanz, die optisch dichter ist als Luft, wird ein Lichtstrahl durch das Prisma in der auf Seite 223 an zwei Prismen zugleich veranschaulichten Weise zweimal gebrochen. Der Winkel, welchen der aus der zweiten Fläche tretende Strahl mit dem auf der ersten einfallenden macht, hängt von dem Winkel des Prismas und seinem Brechungsvermögen ab. Man kann ihn mittels jenes schon bei Gelegenheit der Messung eines Prismenwinkels beschriebenen drehbaren Tischchens bestimmen und ermittelt auf diese Weise das Brechungsverhältnis der verschiedenen Substanzen zunächst gegen Luft. Auch Flüssigkeiten und Gase kann man leicht derselben Untersuchungsmethode unterwerfen, indem man ein hohles Glasprisma mit planparallelen Wänden benutzt, in welchem jene Stoffe eingeschlossen werden, denn jene gläsernen Begrenzungsflächen haben, wie wir oben sahen, keinen Einfluß auf den Weg der Lichtstrahlen.

Durch die beschriebene Untersuchungsmethode findet man immer nur das Brechungsverhältnis des betreffenden Mittels gegen Luft. Will man das absolute Brechungsvermögen

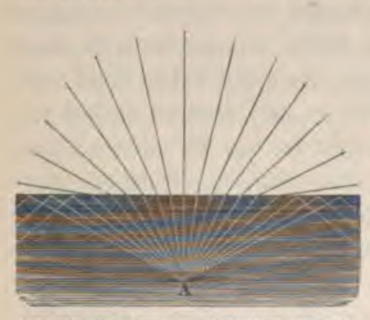
einer Substanz ermitteln, so muß man vorher das der Luft gegen den leeren Raum kennen. Durch eine entsprechende Versuchsanordnung ist natürlich auch dieses zu finden.

Die aus einem Prisma tretenden und überhaupt alle gebrochenen Strahlen erscheinen zusammengesetzt; sie lösen sich in verschiedenfarbige, voneinander divergierende Strahlen auf, deren besondere Eigenschaften wir später noch ausführlich zu untersuchen haben. An dieser Stelle erwähnen wir dies nur, um festzustellen, daß auch die letzte Eigenschaft unserer über verschieden rauhe Flächen rollenden Rädchen, die mit ungleich langen Achsen nach Überschreitung der Grenzlinie zwischen den verschiedenen Widerstand leistenden Gebieten voneinander divergieren, sich bei den Lichtwirkungen wiederfindet.



Strahlenbrechung. Vgl. Text, S. 223.
a Einfallslot; b streifender Eintritt; e c total reflektierter Strahl; d Grenzwinkel der totalen Reflexion.

Alle diese mit der Lichtbrechung gemachten Erfahrungen lassen uns keinen Zweifel darüber, daß ein Lichtstrahl etwas Materielles und Zusammengesetztes ist, das an anderem Materiellen, an den Atomansammlungen der Körper, einen Widerstand findet. Erinnern wir uns, daß wir bei unseren Betrachtungen der Eigenschaften strahlender Wärme das Licht nur als eine andere physiologische Wirkung einer genügend kräftigen Wärmestrahlung erkannten, so verstehen wir auch ohne weiteres die bisher gefundenen Eigenschaften des Lichtes. Seine Strahlen gehen von den schwingenden Molekülen eines heißen Körpers aus als ein nach allen Seiten von jenem Materiekomplexe zurückgeworfener Strom freier Ätheratome. Die auf einer geraden Linie von einem Molekül des strahlenden zu einem solchen des bestrahlten Körpers aufeinanderfolgenden Ätheratome stehen offenbar in einer Beziehung zueinander, die durch die Schwingungen des strahlenden Moleküls bedingt ist. Beschreibt das letztere eine Kreisbahn, so müssen die von ihm nacheinander zurückgeworfenen Ätheratome miteinander verbunden, eine Spirallinie bilden, zu welcher sich durch ihre Geschwindigkeit das von ihnen übertragene Bild jener Kreisbewegung gewissermaßen auszieht. Ein Querschnitt einer solchen Spirale hat die Form einer Wellenlinie. Die strahlende Wärme und das Licht pflanzen sich also durch Ätherwellen fort, deren Form und sonstige Eigenschaften von der kreisenden Bewegung der Moleküle des strahlenden Körpers abhängen. Die Geschwindigkeit der Fortpflanzung der Wärme- und Lichtwirkungen ist hier durchaus nicht gleichbedeutend mit der Geschwindigkeit dieser Wellenbewegung selbst. Die Stöße der Ätheratome sind es ja nicht, welche Wärme und Licht hervorbringen, denn sie könnten ja auch von vollkommen ruhenden Molekülen reflektiert werden, die auf dem absoluten Nullpunkt der Temperatur angekommen sind. Nach unserer hypothetischen Ansicht erzeugen die Stöße der Ätheratome die Gravitationswirkungen, und nur die Veränderungen ihrer mittleren Geschwindigkeit bewirken die scheinbare Wellenbewegung des Äthers. Für unsere Zwecke müssen wir also von der fortschreitenden Bewegung dieser Atome selbst ganz absehen und unsere Betrachtungen fortan so einrichten, als ob sie überhaupt nur jene schwingenden Bewegungen ausführten.



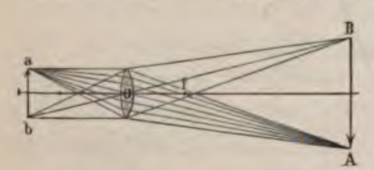
Totale Reflexion. Vgl. Text, S. 224.

beliebigen Punkte treffen, den wir auf unserer Figur mit E bezeichnet haben, also oberhalb des Wassers ein Strahlenbündel von 180° Ausbreitung bilden, dringen in das Wasser doch nur von E aus als Bündel mit einem Ausbreitungswinkel von 2 mal $48^1/_2$° also 97° ein; sie werden in dem dichteren Mittel stark zusammengedrängt, konzentriert. Würde weiter kein Licht in das Wasser eindringen, so müßte es auf dem Gebiete jenes Strahlenbündels von 97° stark beleuchtet sein, während jenseit desselben überhaupt kein Licht in das Wasser gelangt. Wir nennen den Winkel, welchen jener äußerste, noch in das dichtere Mittel gelangende Strahl mit dem Einfallslote macht, den **Grenzbrechungswinkel**. Anderseits kann der Strahl ec überhaupt nicht aus dem Wasser gelangen.



Zerstreuungslinse. Vgl. Text, S. 226.

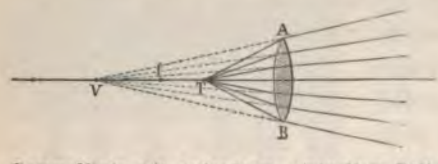
Wir können nun den Weg der Strahlen umkehren und müssen dann auch die umgekehrte Wirkung beobachten (s. die untere Abbildung, S. 222). Es breitet sich im Wasser ein Strahlenbündel von dem Punkt A aus; dann wird nur ein Bündel von 97° Öffnung das Wasser verlassen können und sich in der Luft über die ganzen 180° der Wasserfläche ausbreiten. Die gebrochenen Strahlen werden zum Teil auch an der brechenden Fläche reflektiert, zerlegen sich hier also in zwei Teile; die Strahlen, welche von dem Gebiet außerhalb des Grenzbrechungswinkels die Wasseroberfläche treffen, werden überhaupt nur nach dem Gebiete jenseit des Grenzbrechungswinkels in das Wasser zurückgeworfen, es findet für sie **Totalreflexion** statt. Man nennt deshalb den Grenzbrechungswinkel auch den der Totalreflexion.



Sammellinse mit umgekehrtem, reellen Bild. AB = Objekt; ab = reelles Bild. Vgl. Text, S. 226.

Ein sehr schönes Beispiel von Totalreflexion zeigt die **blaue Grotte auf Capri**. Das vom Tageslichte hell beleuchtete Wasser außerhalb der Grotte sendet seine Strahlen durch die fast ganz unter Wasser befindliche Öffnung der Grotte von untenher gegen die Wasseroberfläche in der Grotte unter einem spitzen Winkel, der jenseit des Grenzbrechungswinkels liegt. Das Licht kann also nicht über die Oberfläche gelangen und beleuchtet deshalb das Wasser und alle Gegenstände in demselben in so ungewöhnlicher Weise, daß die Gegenstände unter dem Wasser einen hellen Silberglanz annehmen, und daß vom Wasser jener eigenartige diffuse blaue Schein ausgeht, der der Grotte ihren Namen gab.

Die Totalreflexion wird auch bei den bekannten Farbenspielen der sogenannten leuchtenden Fontänen verwendet. Ein von unten in den Wasserstrahl geleiteter Lichtstrahl kann den ersteren nicht wieder verlassen, da für ihn der Grenzbrechungswinkel überschritten ist. Die beständig an den Innenflächen des Wasserstrahls reflektierten Lichtstrahlen werden dabei gewissermaßen vom Wasser überall mit hingenommen, selbst wenn der Wasserstrahl oben umbiegt und zurückfällt. Das scheinbar selbstleuchtende Wasser wird dadurch wie in einen Funkenregen aufgelöst, der um so mehr überrascht, als die Lichtquelle ganz unsichtbar bleibt.

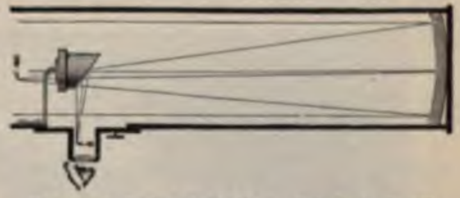


Sammellinse mit aufrechtem, virtuellem Bild (Lupe). T = Objekt; V = virtuelles Bild. Vgl. Text, S. 226.

Aber auch zu wissenschaftlichen Zwecken wird die Totalreflexion vielfach verwendet. Eine total reflektierende Fläche ist offenbar der vollkommenste Spiegel, da sie alle auf sie fallenden Strahlen auch wieder zurückgibt, während ein Metallspiegel immer einen gewissen Prozentsatz

Licht verschluckt und bei einer spiegelnden Glasfläche unter gewöhnlichen Umständen die gebrochenen Strahlen für das Spiegelbild nicht mitwirken. Läßt man auf die eine Seite eines Prismas ABC, dessen Kantenwinkel ein rechter ist, einen Strahl senkrecht fallen, so trifft er die Fläche AB des Prismas unter 45°. Der Grenzbrechungswinkel zwischen Luft und Glas ist aber 42°. Folglich wird der Strahl hier total reflektiert und tritt auf der anderen Seite des Prismas völlig ungeschwächt und ungebrochen, also wieder senkrecht, aus. Für viele optische Instrumente ist die Anwendung eines solchen total reflektierenden Prismas sehr wertvoll (s. die obere Abbildung, S. 223).

Es mögen zwei gleiche Prismen so gelegt sein, daß ihre Basisflächen zueinander parallel sind. Wir führen von der einen Seite her je einen zu dieser Basis parallelen Strahl auf jedes der Prismen (s. die mittlere Abbildung, S. 223). Dann werden die austretenden Strahlen sich auf der anderen Seite in einem bestimmten Punkte schneiden, dessen Abstand von den Prismen zunächst von ihrem Winkel und ferner vom Brechungsvermögen der Prismensubstanz abhängt. Je größer der Prismenwinkel und das Brechungsvermögen ist, desto näher rückt der Punkt und umgekehrt. Diese Vereinigung zweier Strahlen hat offenbar große Ähnlichkeit mit der Wirkung zweier zueinander symmetrisch liegender Elemente eines Hohlspiegels, nur daß der Vereinigungspunkt beim Hohlspiegel vor, bei den Prismen hinter den optisch wirksamen Flächen liegt. Wie wir uns nun die Hohlspiegelwirkung aus einer Vereinigung einer Anzahl von ebenen Spiegeln, die unter bestimmten Winkeln zusammenstoßen, entstanden denken können, so ist offenbar auch hier eine brechende Fläche zu konstruieren, welche ebenso wie ein Hohlspiegel alle auffallenden Strahlen in einem Punkte vereinigt. Wir kommen dabei zu denselben Resultaten wie beim Hohlspiegel, nur entstehen die Bilder hinter der brechenden Fläche. Aber es spielt hier, wie schon erörtert, bei den verschiedenen Ausmessungen, zum Beispiel der Brennweite, das Brechungsvermögen eine Rolle.



Newtons Spiegelteleskop. Vgl. Text, S. 227.

Eine gekrümmte, in der angedeuteten Weise wie ein Hohlspiegel wirkende brechende Fläche nennt man, von ihrer gebräuchlichsten Form ausgehend, eine Linse. Es sind folgende Kombinationen der brechenden Flächen möglich, für die wieder stets Kugelsegmente genommen werden (s. die untere Abbildung, S. 223): Die eine Seite kann nach außen hin gebogen, konvex, die andere eben sein, die Linse ist dann plankonvex (B). Ist die Krümmung der Fläche nach innen gerichtet, so haben wir eine plankonkave Linse (E). Die verschiedenen Verbindungen dieser Flächen ergeben dann noch bikonvexe, sogenannte Sammellinsen (A), bikonkave oder Zerstreuungslinsen (D), konkav-konvexe und konvex-konkave Linsen (C und F). Da auch die Linsen den Fehler haben, der die uns schon bekannte sphärische Abweichung zeigt, weil sie kugelförmig, nicht parabolisch geschliffen werden, so müssen auch sie, um den entstehenden Fehler bei der Strahlenvereinigung möglichst klein zu machen, die Bedingung erfüllen, daß ihre Öffnung zu ihrem Kugeldurchmesser sehr klein ist. Dies bedingt, daß sie sehr dünn hergestellt werden. Sammellinsen, die in ihrer Mitte verhältnismäßig dick sind, haben eine große sphärische Abweichung.



Gregorys Teleskop. Vgl. Text, S. 228.

Wiederum rein geometrische Methoden, deren Verfolgung nur eine Aufgabe der Mathematik ist, führen zu dem Resultat, daß die Lage des Brennpunktes f zu dem der Krümmungsmittelpunkte der beiden Flächen einer bikonvexen Linse r_1 und r_2 in dem Verhältnis $\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$ steht. Diese Formel ist bis auf den vom Brechungsverhältnis n abhängigen Faktor identisch mit der, welche wir beim Hohlspiegel zwischen zwei konjugierten Punkten fanden, und gilt auch für alle anderen Linsenkombinationen; für eine ebene Fläche wird nur r unendlich groß, für eine konkave Fläche negativ. Für eine plankonkave und noch mehr für eine bikonkave Linse wird der ganze Ausdruck negativ, d. h. der Brennpunkt liegt auf derselben Seite wie das Objekt. Die von hier auf die andere Seite austretenden Strahlen müssen divergieren: die Linse zerstreut das Licht, wie es ein konvexer Hohlspiegel tun würde.



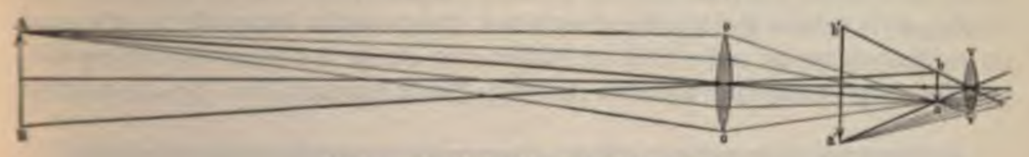
Teleskop Leviathan des Lord Rosse. Nach W. Meyer, „Das Weltgebäude". Vgl. Text, S. 229.

Auch sonst sind alle auf die Entstehung des Bildes bezüglichen Verhältnisse die gleichen bei Hohlspiegeln und Linsen. Wir wiederholen deshalb hier nur die Resultate und finden, daß auch die Sammellinsen ein umgekehrtes reelles Bild von einem Gegenstand entwerfen, der sich außerhalb der Brennweite befindet. Die Größe dieses Bildes steht im direkten Verhältnisse seiner Entfernung von der Linse zu der des Objektes von derselben. Befindet sich das Objekt T zwischen Linse und Brennpunkt, so entsteht, wie beim Hohlspiegel, ein virtuelles aufrechtes vergrößertes Bild V, aber diesseit der Linse, während es beim Hohlspiegel hinter ihm lag, und die Sammellinse wirkt als Lupe. Die Figuren auf S. 224 mögen diese Strahlengänge weiter veranschaulichen.

d) Die optischen Instrumente.

Mit den bisher gesammelten Erfahrungen wollen wir die Konstruktion der hauptsächlichsten optischen Sehwerkzeuge betrachten, soweit ihre Verbesserung für die Farbenzerstreuung der Linsen noch nicht in Betracht kommt.

Bei den Fernrohren unterscheidet man zwei besondere Arten, die **Reflektoren** und die **Refraktoren**. Bei den ersteren ist die maßgebende optische Fläche ein Hohlspiegel, bei den Refraktoren dient eine Linse oder eine Kombination verschiedener Linsen.

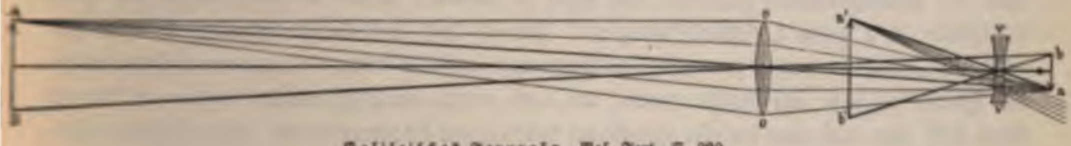


Kepplersches Fernrohr. Vgl. Text, S. 229.

In früheren Zeiten bis in den Anfang des 19. Jahrhunderts hinein wurden, um sehr ferne Objekte vergrößert zu zeigen, noch vielfach Reflektoren verwendet, weil diese den sehr störenden Fehler der Farbenzerstreuung, den man erst in jüngerer Zeit zu bemeistern lernte, überhaupt nicht aufweisen. Wir wissen, daß ein Hohlspiegel von einem sehr entfernten Objekt ein umgekehrtes Bild in seinem Brennpunkt entwirft. Wollten wir dieses direkt betrachten, so müßten wir uns vor den Spiegel stellen und dadurch einen Teil der vom Objekte kommenden Strahlen durch unseren Körper verdecken. Um dies zu vermeiden, stellen wir etwas vor dem Brennpunkte des Spiegels in 45° Neigung zum Zentralstrahle des Hohlspiegels einen kleinen ebenen Spiegel auf, durch welchen der Strahlenkegel seitlich geleitet wird, wie es die obere Abbildung, S. 225, zeigt. Wir können nun das Bild entweder direkt oder durch eine Sammellinse betrachten, die wir etwas jenseit des Brennpunktes aufstellen und als Lupe wirken lassen, wobei wir unser Auge derselben nahe bringen, um ihrer Oberfläche näher als ihr Brennpunkt zu bleiben. Die Lupe, in diesem Fall **Okular** genannt, vergrößert noch das ursprüngliche Brennpunktbild. Für die Vergrößerung und Lichtstärke des Bildes hatten wir schon gefunden, daß jene mit der Brennweite, diese mit der Öffnung wächst. Zu der direkten Vergrößerung durch den Hohlspiegel (Objektivvergrößerung) tritt nun noch die Okularvergrößerung durch die Okularlupe. Rechnet man diese Vergrößerungen, wie heute allgemein üblich ist, linear, so nimmt die Lichtstärke offenbar im quadratischen Verhältnis zur Gesamtvergrößerung ab. Durch Verkleinerung der Brennweite und entsprechende Okularvergrößerung kann demnach für die Lichtstärke kein Vorteil erreicht werden. Für das astronomische Sehen kommt es oft nur darauf an, ein sehr



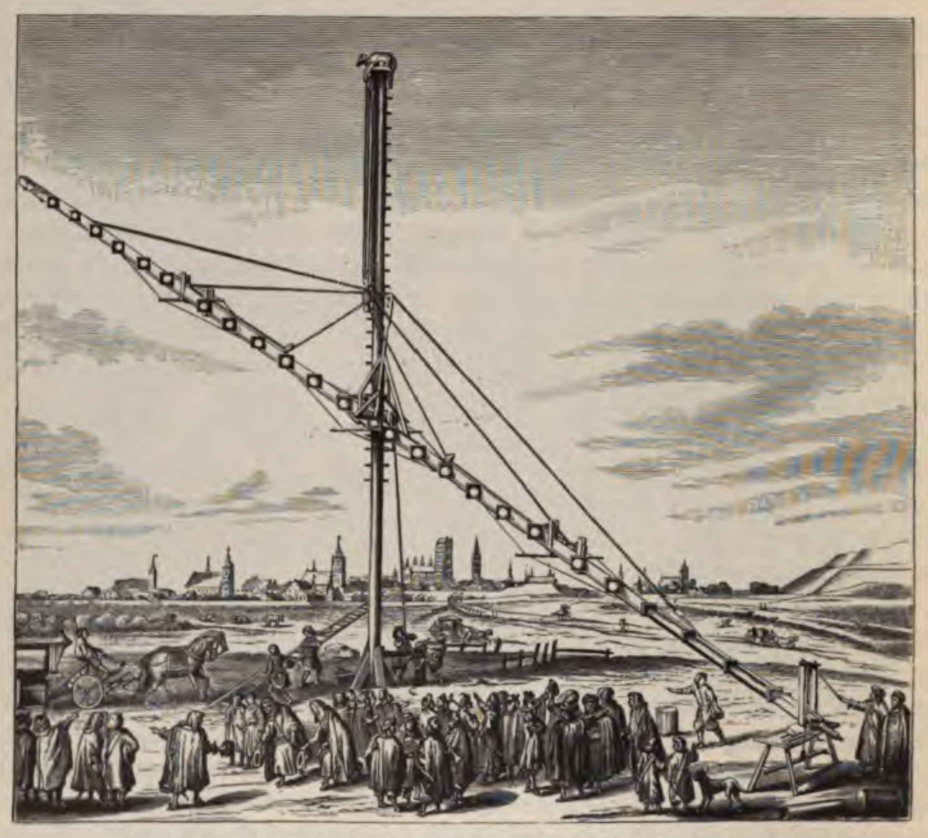
Terrestrisches Fernrohr. Vgl. Text, S. 229.



Galileisches Fernrohr. Vgl. Text, S. 230.

lichtschwaches Objekt überhaupt zu erkennen. Oft will man dagegen möglichst viele Details genau betrachten. Das ist bei den Oberflächen der Körper unseres Planetensystems der Fall, bei denen immer Licht genug vorhanden ist, um die Vergrößerung entsprechend weit treiben zu können. Für solche Untersuchungen gebraucht man deshalb Fernrohre mit möglichst großer

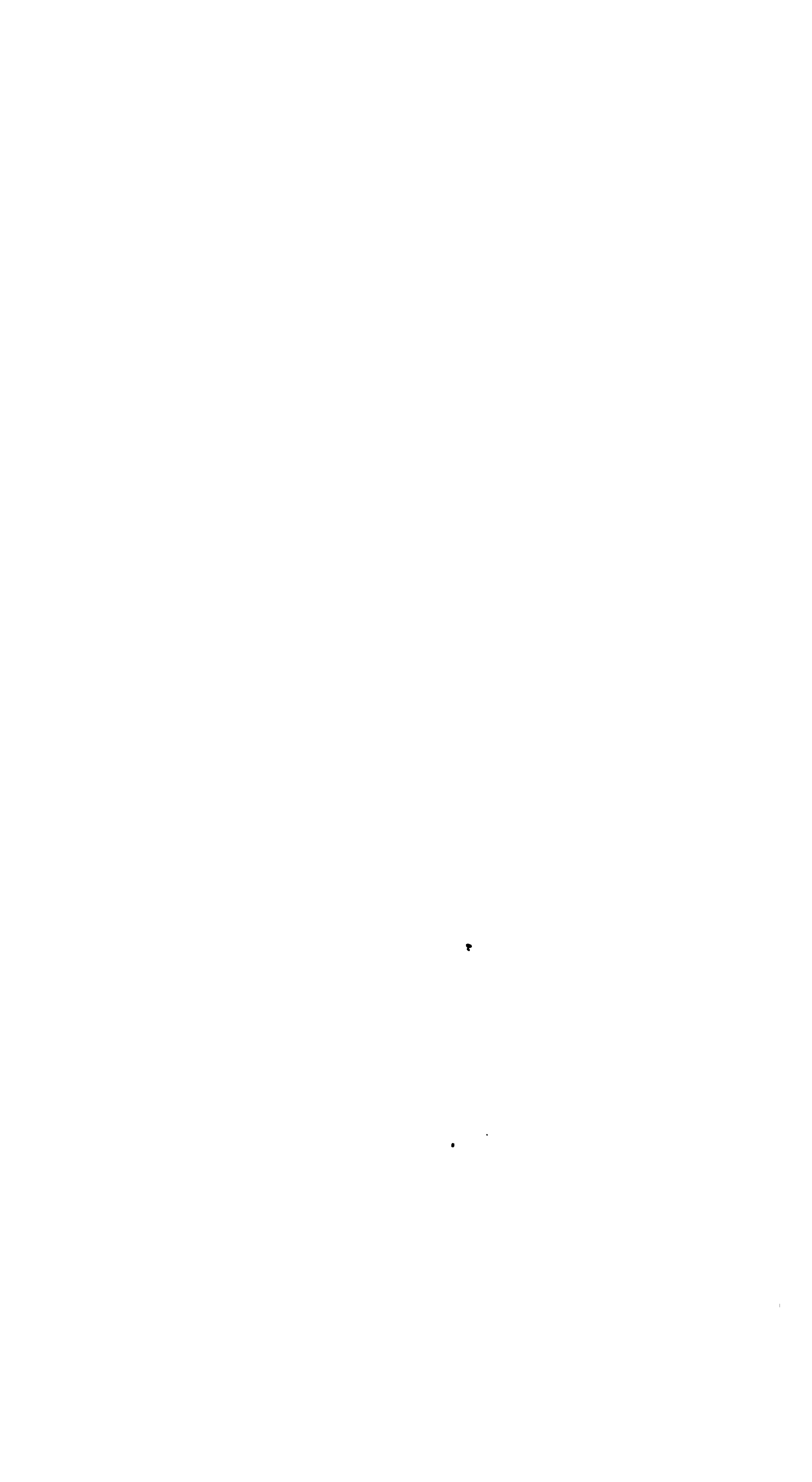
Brennweite, ohne daß die Objektivöffnung besonders weit zu sein braucht, und hat damit zugleich den Vorteil einer korrekteren Durchzeichnung der zu erforschenden Einzelheiten bis zu den Randpartien des Bildes. Allzu große Lichtstärke kann in solchen Fällen sogar schädlich wirken, weil dadurch sehr feine, sehr nahe beieinander liegende Einzelheiten sich gegenseitig überstrahlen und in unserem Gesichtseindruck verwischen. Andere optische Bedürfnisse liegen dagegen für die Beobachtung der reichen Welt der Fixsterne vor, die alle so weit von uns entfernt sind, daß keine Vergrößerung ihren Charakter als optische Punkte verändern kann. Um also möglichst

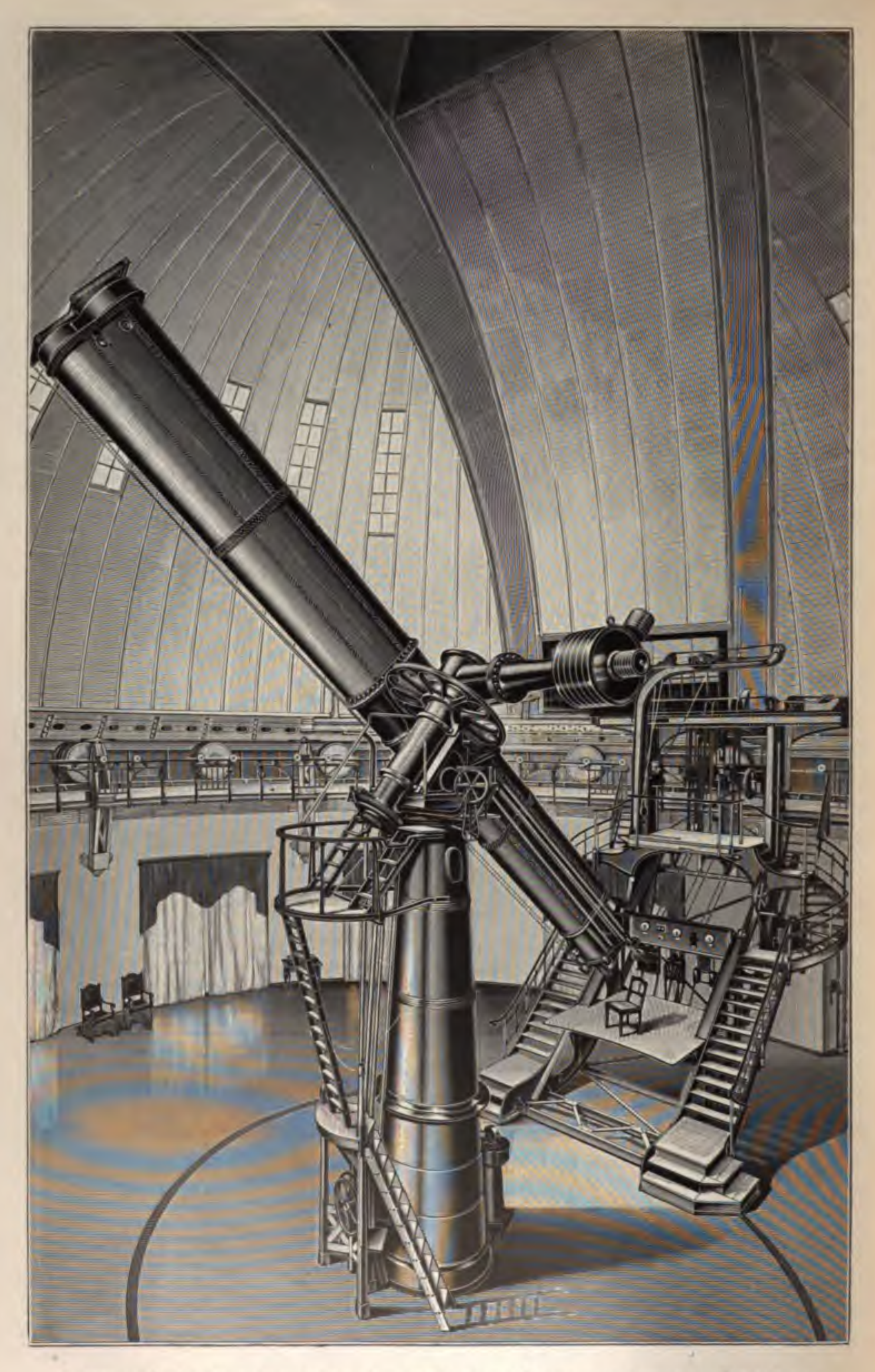


Hevelius' großes Fernrohr. Nach Hevelius' „Machina coelestis“. Vgl. Text, S. 229.

viele der allerschwächsten Fixsterne noch sehen zu können, kommt es hauptsächlich auf große Lichtstärke, d. h. große Objektivöffnung an. Freilich darf auch die Brennweite, also die Vergrößerung, nicht zu gering genommen werden, weil sonst im Bilde die einzelnen Lichtpünktchen der Sterne zu nahe aneinander treten, um noch einzeln wahrgenommen werden zu können. Man sieht also, daß man für alle Zwecke am besten große Brennweite mit großer Öffnung kombiniert, die ja durch Abblendung immer verkleinert werden kann.

Dem Spiegelteleskop, wie wir es vorhin beschrieben, wird auch noch eine andere, für die Aufsuchung der Objekte bequemere Form gegeben (s. die untere Abbildung, S. 225). Man macht zu dem Zweck in der Mitte des Hohlspiegels HH ein Loch für die Aufnahme des Okulars und stellt ihm gegenüber, etwa auf halber Brennweite des großen Spiegels, einen kleineren





Grosser Refraktor des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam.

Hohlspiegel h auf, der das parallel in das Fernrohr eindringende Strahlenbündel, welches von dem großen Hohlspiegel H H konvergierend in F zu einem Bilde zusammentrifft, in das Okular zurückwirft, so wie es in der Zeichnung angedeutet ist. Mit solchen Teleskopen sieht man direkt gegen das Objekt hin, während man bei der vorhin beschriebenen Konstruktion seitlich in das obere Ende des Rohres (Tubus) blicken muß.

Die beiden in der astronomischen Welt am berühmtesten gewordenen Spiegelteleskope sind die von William Herschel und Lord Rosse. Letzteres, von dessen Bau wir auf S. 226 eine Abbildung geben, ist noch heute in hervorragender Weise für die Wissenschaft tätig.

Die Reflektoren verschlucken durch die doppelte Spiegelung ihrer Strahlen viel Licht, während die Linsen der Refraktoren, wenn sie nicht sehr große Dimensionen annehmen, nur wenig Licht absorbieren. Dies ist einer der wichtigsten Vorteile der Refraktoren vor den Reflektoren.

Die für die Refraktoren benutzten optischen Kombinationen sind sehr verschiedener Art. Am einfachsten und den vorhin beschriebenen Reflektoren optisch am ähnlichsten ist das sogenannte astronomische oder Kepplersche Fernrohr (s. die obere Abbildung, S. 227.) Es besteht im Prinzip aus zwei Sammellinsen, dem Objektiv o o und dem Okular v v. Das Objektiv erzeugt in seinem Brennpunkte ein reelles umgekehrtes Bild b a von einem astronomischen Gegenstand A B, das dann durch das Okular als Lupe betrachtet wird, so daß das vergrößerte Bild b′ a′ entsteht. Der Brennpunkt beider Linsen fällt also zusammen. Ein astronomisches Fernrohr vertauscht demnach oben und unten sowie rechts und links, was ja in Bezug auf die Himmelsobjekte für uns nicht weiter störend ist. Man kann ein solches Fernrohr in ein sogenanntes terrestrisches verwandeln, in welchem die Gegenstände aufrecht erscheinen, indem man noch ein Linsensystem C, D hinzufügt, das das Bild gewissermaßen als ein zweites Objektiv noch einmal umkehrt. Der zugehörige Strahlengang ist in der mittleren Abbildung, S. 227, dargestellt.

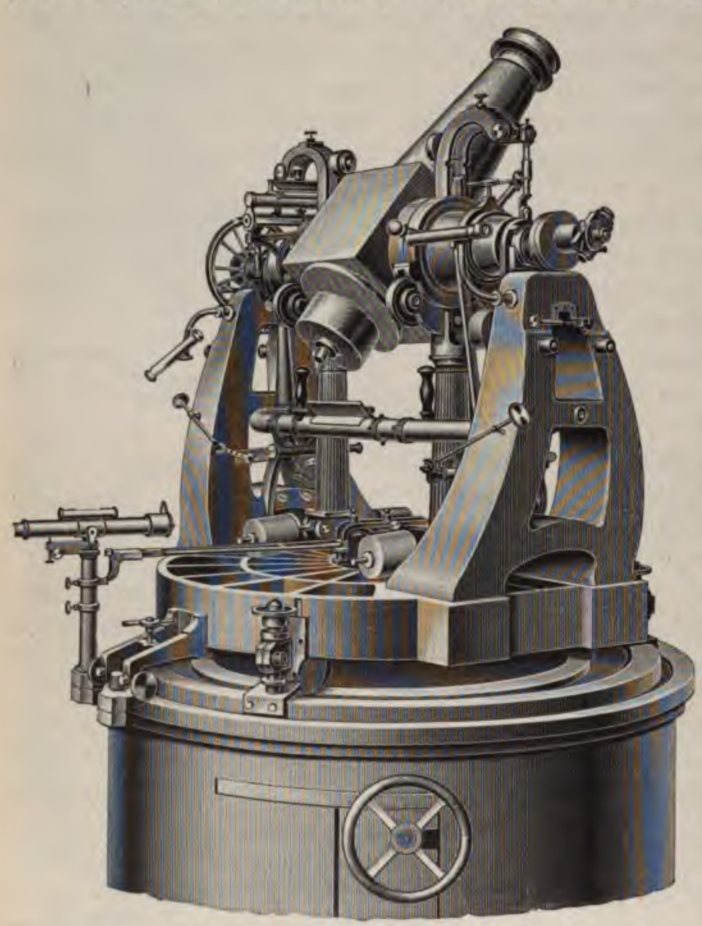


Opernglas. Vgl. Text, S. 230.

Bald nach der Erfindung des Fernrohres, um 1610, hat man solche einfachen astronomischen Fernrohre in sehr großen Dimensionen gebaut, da man die optischen Vorteile großer Brennweiten sofort erkannt hatte. Der Danziger Ratsherr Hevelius baute deshalb sogenannte Luftfernrohre, bei denen das Objektiv mit dem Okular wegen ihrer großen Entfernung voneinander gar nicht mehr durch ein Rohr verbunden wurde. Auf S. 228 ist sein Fernrohr abgebildet, mit dem er viele für seine Zeit sehr wertvolle Beobachtungen angestellt hat.

In der gegenwärtigen Zeit hat man es durch sinnreiche Kombination von Linsen, die wir erst später kennen lernen werden, verstanden, die optischen Fehler kürzerer Brennweiten entsprechend zu verkleinern, so daß selbst recht kleine Fernrohre heute mehr leisten wie einst jene Riesen aus dem 17. Jahrhundert. Immerhin haben auch heute wie immer die großen Brennweiten und Öffnungen die größeren allgemeinen Vorteile; deshalb trachtet man immer noch, möglichst große Fernrohre zu bauen, deren Kosten freilich nach und nach in das Ungeheuerliche wachsen. Der größte gegenwärtig existierende Refraktor ist mit der zugehörigen Sternwarte von einem amerikanischen Krösus (Yerkes) bei Chicago errichtet worden. Es hat eine Brennweite von etwa 18 m und eine Öffnung von mehr als 1 m (40 engl. Zoll). Nebenstehende Tafel bringt ein ihm an Größe fast gleichkommendes Instrument, den großen Refraktor des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam zur Anschauung.

Optisch wesentlich verschieden von der bisher betrachteten Kombination ist die des sogenannten **Galileischen Fernrohres**, das bei uns heute noch in der Form von Operngläsern benutzt wird (s. die Abbildung, S. 229). Der Strahlengang wird aus der unteren Abbildung, S. 227, klar. Das Fernrohr besteht aus einer Sammel- und einer Zerstreuungslinse. Die erstere, oo, dient wie bei den anderen Fernrohren als Objektiv; aber bevor dasselbe seine Strahlen im Brennpunkte, bei b a, vereinigen kann, fängt sie die als Okular verwendete Zerstreuungslinse v v auf und macht die vorher gegen den Brennpunkt hin konvergierenden Strahlen divergierend. Da dies vor der Durchkreuzung derselben im Brennpunkte geschieht, bleibt das Bild a′b′ aufrecht und wird durch die Zerstreuungslinse vergrößert. Diese Zusammenstellung hat den Vorteil, daß das Fernrohr wesentlich kürzer wird als ein solches, dessen Okular die Strahlen erst jenseit des Brennpunktes aufnimmt; aber das Okular muß dafür um so größer gemacht werden, wenn es alle vom Objektiv kommenden Strahlen auffangen soll. Aus diesen und anderen Gründen wird das Galileische Fernrohr zu astronomischen Zwecken überhaupt nicht mehr benutzt.

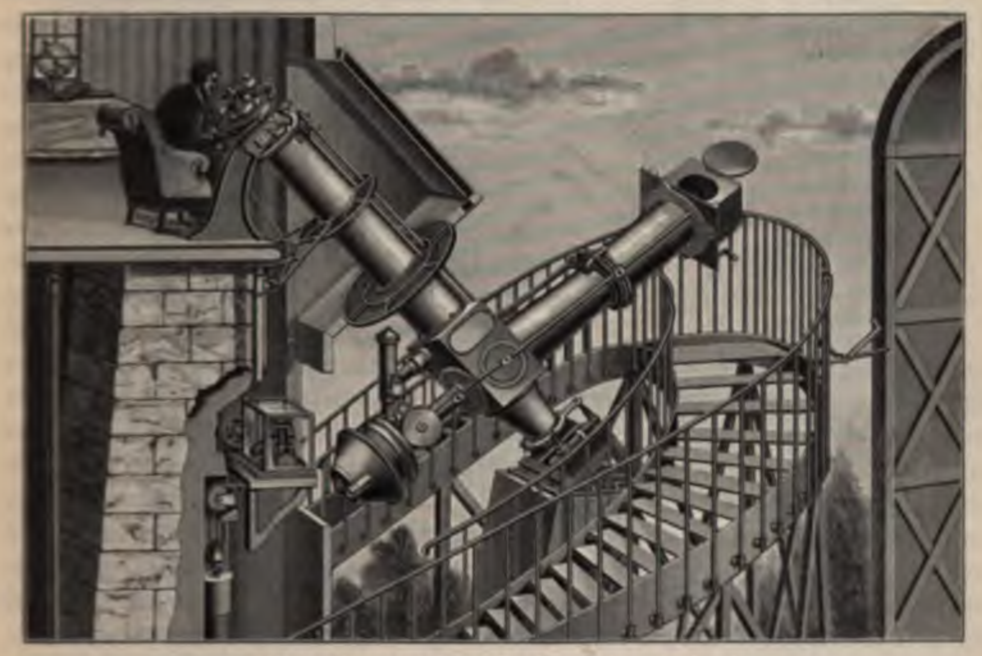


Gebrochenes Fernrohr (Alt-Azimut).

In vielen Fällen ist es erwünscht, nur immer in horizontaler Richtung zu sehen, während das Fernrohr doch den ganzen Himmel beherrschen soll. Man schaltet dann in der Mitte des Strahlenweges vom Objektiv zum Okular ein total reflektierendes Prisma ein. Dreht man den horizontalen Teil eines solchen **gebrochenen Fernrohres** um seine optische Achse, so beschreibt das Objektiv einen Halbkreis um den Himmel. Wenn man dem Fernrohre noch eine Drehung in seiner horizontalen Ebene gibt, kann man das Objektiv in Bezug auf den Horizont in jede Lage bringen. Ein solches Instrument nennt man ein Alt-Azimut (s. die obenstehende Abbildung).

In größtem Maßstabe sind Linsen mit total reflektierenden Prismen in dem sogenannten Equatorial coudé, **Ellbogenäquatorial**, verbunden. Das größte derartige Instrument,

das der Pariser Sternwarte, ist hier unten abgebildet. Während die verschiedene Lage und die scheinbare Bewegung der Himmelskörper um die Weltachse den Beobachter an einem gewöhnlichen Refraktor zwingt, sehr verschiedene Lagen einzunehmen, wodurch bei den wachsenden Dimensionen der astronomischen Sehwerkzeuge manche besonderen, zum Teil auch recht kostspieligen Einrichtungen getroffen werden müssen, so werden dagegen in dem neuen Fernrohr alle von irgend welchem Punkte des Himmels kommenden Strahlen durch die Stellung des Fernrohres und seiner Prismen in ein und dieselbe Richtung gegen das Okular geleitet, so daß der Beobachter in seinem Arbeitszimmer wie am Schreibtisch sitzend den ganzen Himmel zu durchforschen vermag.

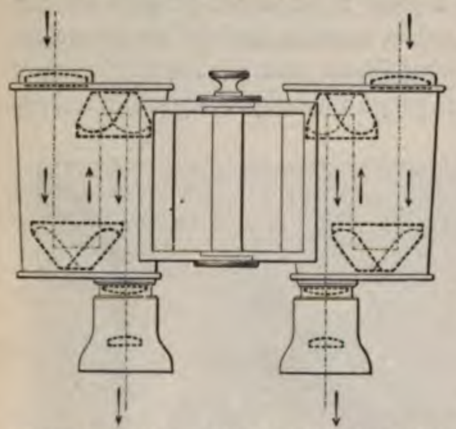


Ellbogenäquatorial des Pariser Observatoriums.

Sehr ausgiebiger Gebrauch von total reflektierenden Prismen wird auch in den neuen sogenannten Triëderfernrohren gemacht, von denen eins mit seinem Strahlenweg auf S. 232 abgebildet ist. Dadurch, daß die Strahlen in demselben dreimal hin und zurück geleitet werden, haben diese Instrumente unter Beibehaltung ihrer handlichen Form die Vorteile einer bedeutend größeren Brennweite.

Da das vom Objektiv eines Fernrohres entworfene Bild, wie wir wissen, um so weiter von jenem entfernt liegt, je näher uns das Objekt selbst ist, und da ferner der Brennpunkt des Okulars mit diesem Bilde zusammenfallen muß, so machen wir das Okular beweglich, einstellbar. Wir verstehen deshalb ohne weiteres, daß diese Einstellung uns etwas über die Entfernung des Objektes selbst aussagt, daß wir sie also zu einer Distanzmessung verwenden können. Nach diesem Prinzip hat man wirklich solche Instrumente gebaut. Unsere Formel auf S. 212, welche die Beziehung der konjugierten Punkte zum Brennpunkt angibt, $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p_1}$, zeigt z. B., daß für ein Handfernrohr von 1 m Brennweite die Einstellung für ein Objekt von 100 m Entfernung um 1 cm gegen die Einstellung auf ein unendlich entferntes

Objekt verändert werden muß. Für 200 m Entfernung erhalten wir eine Verschiebung des Brennpunktes von 5 mm, für eine abermalige Verdoppelung der Distanz wiederum die Hälfte von 5 mm, u. s. f. Wir sehen also, daß die Verschiebungen bald recht klein werden; die Messungen werden für größere Entfernungen sehr unsicher. Später werden wir noch einen anderen Distanzmesser kennen lernen, der auf dem stereoskopischen Sehen der beiden Augen beruht.



Durchschnitt eines Zeißschen Triederbinokels. Vgl. Text, S. 231.

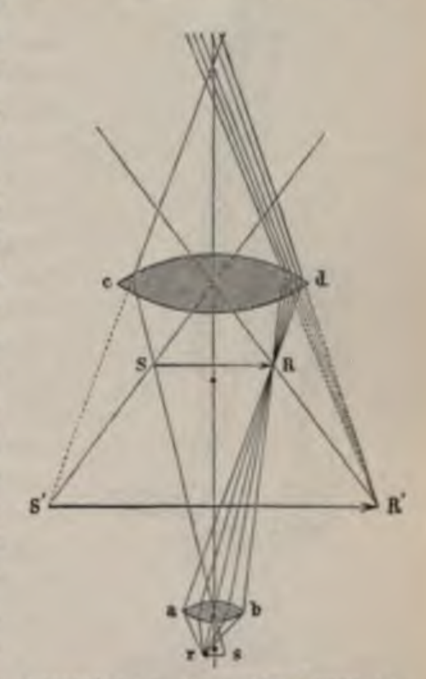
Das **Mikroskop** ist optisch genau so konstruiert wie das astronomische Fernrohr. Der Strahlengang in einem solchen wird durch die Figur, S. 233, nach dem Vorangegangen wohl zur Genüge veranschaulicht. Wir haben gesehen, daß eine Sammellinse ein vergrößertes Bild von einem Objekt entwirft, das sich zwischen ihrem Krümmungsmittelpunkt und dem Brennpunkte befindet. Die Vergrößerung nimmt zu, je näher man dem Brennpunkte kommt und je kleiner die Brennweite selber ist; denn die Bildgröße wächst proportional dem Verhältnis des Bildabstandes zum Objektabstande von der Linse. Die betreffenden Verhältnisse kehren sich demnach für das Mikroskop gegenüber dem Fernrohr um, weil man die im ersteren zu betrachtenden Gegenstände dem Objektiv beliebig nahe bringen kann. Es ist nur nötig, daß sie noch außerhalb der Brennweite bleiben, sonst würde die Linse nur als Lupe wirken, aber kein reelles Bild mehr entwerfen. Je kürzer die Brennweite gemacht wird, desto mehr müssen die Sammellinsen gewölbt sein, wobei man schließlich zu einer Grenze gelangt, wo der Brennpunkt noch innerhalb des Glaskörpers der Linse liegt. Solche Linsen sind dann praktisch nicht mehr verwendbar; doch hat man, um auch hier noch soweit wie möglich gehen zu können, sogenannte **Ölimmersionen** eingeführt, welche die Luftschicht zwischen dem Objekt und dem Objektiv völlig ausschalten, so daß die Krümmung des letzteren nicht mehr in Bezug auf das Brechungsverhältnis zwischen Luft und Glas, sondern zwischen Öl und Glas berechnet wird, wodurch die oben angedeuteten optischen Vorteile erreicht werden. Im Mikroskop kann man die Okularvergrößerung, wenn man von den störenden Wirkungen der später zu behandelnden Beugung absieht, bis zu jeder technisch ausführbaren Grenze steigern, da für die mikroskopischen Objekte nicht mehr wie für die astronomischen die Frage der Lichtstärke in Betracht kommt. Man kann ja auf das Objekt durch einen Hohlspiegel Licht werfen und es so stark beleuchten, wie es für die angewandte Vergrößerung notwendig ist. Auf S. 234 und 235 ist ein Mikroskop und Schnitte durch ein Mikroskop-Objektiv und -Okular abgebildet.



Zeiß' Triederbinokel. Vgl. Text, S. 231.

An die optischen Eigenschaften eines **photographischen Objektivs** werden, auch abgesehen von der Frage der Farbenzerstreuung, wesentlich andere Ansprüche gemacht als an die bisher betrachteten Sehwerkzeuge. Wir haben schon früher gesehen, daß ein einfaches Loch eigentlich das vollkommenste photographische Objektiv ist, wenn es nur darauf ankommt, ein getreues Bild zu entwerfen. Aber eine solche Lochcamera-Aufnahme nimmt fünf Minuten in Anspruch, während ein gewöhnlicher photographischer Apparat sein Bild in dem fünfzigsten

Teil einer Sekunde festhalten würde. Das photographische Objektiv soll, damit wir Momentaufnahmen machen können, die Lichtstärke soweit als möglich erhöhen; die diesbezüglichen Bedürfnisse sind also denen des Fernrohres verwandt. Bei diesem braucht aber die Flächenausdehnung des verwendbaren Brennpunktbildes nicht groß zu sein; denn man kann die zu beobachtenden Einzelheiten eines Gesamtbildes immer nacheinander in die Mitte des Fernrohres bringen, wie es beim direkten Sehen das Auge allein tut, und man wird hierbei immer die Vorteile der optischen Achse für die Genauigkeit des Bildes verwenden. Dagegen verlangt man von dem photographischen Bilde, daß es auf einer großen Fläche überall zugleich ein getreues Bild entwirft. Die sphärische Abweichung ist also möglichst zu verringern. Diese Bedingung ist im Widerstreite mit der zu erreichenden größten Lichtstärke, sobald man handliche Apparate mit kurzen Brennweiten zu bauen wünscht, weil mit der Wölbung der Gläser die sphärische Abweichung wächst, während die Brennweite abnimmt. Da man auch wegen der Vermeidung der Farbenzerstreuung das Objektiv aus mehreren, verschieden geformten Linsen zusammensetzen muß, so hat man eine Reihe von Kombinationen brechender Flächen erdacht und praktisch ausgeführt, die den verschiedenen Bedürfnissen gerecht werden. Man macht sogenannte Landschaftslinsen, die bei kleiner Brennweite einen möglichst großen Bildwinkel haben, dagegen nahe Objekte verzeichnen würden, oder man macht Porträtlinsen, die eine lange Brennweite haben, aber am Rande nicht mehr scharf zu zeichnen brauchen; man kennt Aplanaten, Anastigmate, Kollineare, auf deren besondere optische Eigenschaften wir nicht näher eingehen können.



Strahlengang im zusammengesetzten Mikroskop. rs Objekt; ab Objektiv; cd Okular; SR reelles Bild; S'R' vergrößertes Bild. Vgl. Text, S. 232.

Sehr vielfach werden heute sogenannte Skioptikons oder Projektionsapparate gebraucht, um photographische Aufnahmen vergrößert einem weiteren Zuschauerkreise zugleich zeigen zu können. Es kommt bei ihnen zunächst darauf an, das auf Glas durchsichtig hergestellte photographische Bild, dessen Vergrößerung auf einen weißen Schirm geworfen werden soll, genügend kräftig zu beleuchten; denn davon hängt es ab, wievielmal man das Bild vergrößern kann, ohne daß es für die Beschauung zu lichtschwach wird. Man wendet zu diesem Zwecke die in der Abbildung, S. 236, wiedergegebene Kombination von sogenannten Kondensatorlinsen pq an, in deren Brennpunkt man die Lichtquelle V aufstellt. Wir wissen, daß bei dieser Linsenstellung die Strahlen auf der anderen Seite parallel austreten und folglich das dicht dahinter, bei r, einzuschiebende Glasbild gleichmäßig beleuchten, beziehungsweise durchdringen. Daß man bei solchem Kondensator statt einer beiderseits konvexen Sammellinse zwei plankonvexe anwendet, die ihre ebenen Flächen nach außen kehren, ändert an der Brennweite der Kombination nichts; es werden dadurch die Randstrahlen schlechter vereinigt, die Lage des Brennpunktes wird gewissermaßen unsicherer. Für den Zweck der bloßen Beleuchtung hat diese Linsenkombination den Vorteil, daß es bei ihr auf eine genau bemessene Entfernung der Lampe

von der Linse nicht mehr ankommt, weil der Parallelismus der austretenden Strahlen nicht erheblich leidet. Außerdem hat die ebene Fläche auf der einen Seite den Vorzug, daß man das Glasbild ihr ganz nahe bringen kann. Stellt man in beliebiger Entfernung vom Glasbilde, doch außerhalb der Brennweite, eine Sammellinse von der gewöhnlichen bikonvexen Form auf (in der Abbildung ist dafür die achromatische Linsenkombination ab, cd gewählt), so entwirft diese von dem beleuchteten Glasbild ein umgekehrtes Bild auf einer zu ihm parallel aufgestellten Wand, dessen Größe von dem Verhältnis der Entfernungen des Glasbildes und der Wand von der Projektionslinse abhängt. Man kann also mit ein und derselben Linse beliebige Vergrößerungen erzielen und deshalb den Projektionsapparat als Riesenmikroskop verwenden, das die Welt des Allerkleinsten einer großen Anzahl von Zuschauern zugleich objektiv vorführt. Die einzige Schwierigkeit bietet dabei die Erzielung einer genügenden Lichtstärke. Diese erhält man indes sofort, wenn man die mächtigste aller Lichtquellen, die Sonne, benutzt; es entsteht dadurch das sogenannte Sonnenmikroskop. Das Objekt wird durch das Brennpunktbild der Sonne selbst beleuchtet und dann die von der Projektionslinse divergierenden Strahlen in ein verdunkeltes Zimmer geleitet. Auf diese Art kann man mit Hilfe von zwei gewöhnlichen Sammellinsen sehr starke Vergrößerungen erreichen. Freilich wirkt dabei die große Hitze, die im Brennpunktbilde der Sonne zugleich konzentriert wird, sehr störend, was übrigens auch mehr oder weniger die anderen Beleuchtungsarten bei Projektionen an sich haben. Zwischen die Lichtquelle und das Objekt schiebt man deshalb oft ein Gefäß mit einer Wärme absorbierenden, aber für das Licht durchlässigen Flüssigkeit, z. B. einer Alaunlösung.



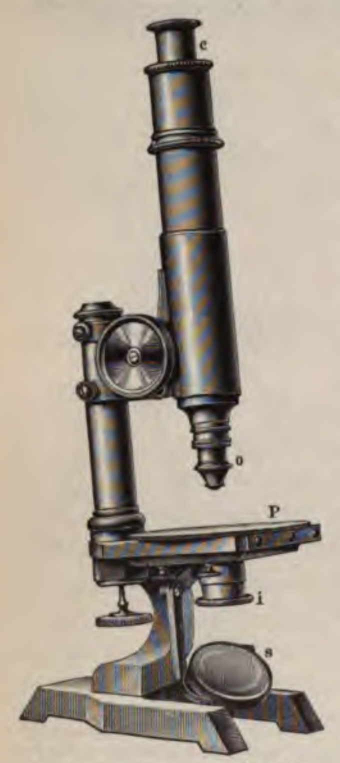
Zusammengesetztes Mikroskop. c Okular; o Objektiv; P Objekttisch mit Blendöffnung; s Spiegel und i Blendzylinder zur Beleuchtung des Objektivs. Vgl. Text, S. 232.

e) Die Farbenzerstreuung.

Alle die bisher ermittelten Wirkungen gebrochener Strahlen sind, so wie sie bisher dargestellt wurden, nur gültig für einfarbiges, monochromatisches Licht. Das weiße Licht ist aber nicht einfarbig, das zeigt ohne weiteres jeder der vorstehend geschilderten Versuche mit gebrochenen Strahlen. Wenn das Licht von einem weißen Gegenstande durch ein Prisma geht, so zeigt der Gegenstand farbige Ränder, die in der Reihe der Regenbogenfarben aufeinander folgen. In der beifolgenden Tafel „Farbenzerstreuung in Prismen und Linsen“ ist dies in Figur 1 durch die beiden äußersten Strahlen, rot und blau, angedeutet. Diese können nur durch die Lichtbrechung aus dem weißen Licht entstanden, also Teile des weißen Lichtes sein. Ebensolche farbige Ränder haben alle Gegenstände, die man durch ein Fernrohr betrachtet, das in der oben beschriebenen Weise nur aus einfachen oder doch einer Kombination von Linsen zusammengesetzt ist, deren Glasarten das gleiche Brechungsvermögen haben.

Wie hier durch die Lichtbrechung Weiß in die Regenbogenfarben aufgelöst wurde, können wir auch durch ein einfaches Experiment die Regenbogenfarben wieder zu Weiß vereinigen. Auf einer Scheibe werden sektorenweise, wie Figur 1 der Tafel „Farbige Lichterscheinungen“ bei

von der Linse nicht mehr ankommt, weil der Parallelismus der austretenden Strahlen nicht erheblich leidet. Außerdem hat die ebene Fläche auf der einen Seite den Vorzug, daß man das Glasbild ihr ganz nahe bringen kann. Stellt man in beliebiger Entfernung vom Glasbilde, doch außerhalb der Brennweite, eine Sammellinse von der gewöhnlichen bikonvexen Form auf (in der Abbildung ist dafür die achromatische Linsenkombination ab, cd gewählt), so entwirft diese von dem beleuchteten Glasbild ein umgekehrtes Bild auf einer zu ihm parallel aufgestellten Wand, dessen Größe von dem Verhältnis der Entfernungen des Glasbildes und der Wand von der Projektionslinse abhängt. Man kann also mit ein und derselben Linse beliebige Vergrößerungen erzielen und deshalb den Projektionsapparat als Riesenmikroskop verwenden, das die Welt des Allerkleinsten einer großen Anzahl von Zuschauern zugleich objektiv vorführt. Die einzige Schwierigkeit bietet dabei die Erzielung einer genügenden Lichtstärke. Diese erhält man indes sofort, wenn man die mächtigste aller Lichtquellen, die Sonne, benutzt; es entsteht dadurch das sogenannte Sonnenmikroskop. Das Objekt wird durch das Brennpunktbild der Sonne selbst beleuchtet und dann die von der Projektionslinse divergierenden Strahlen in ein verdunkeltes Zimmer geleitet. Auf diese Art kann man mit Hilfe von zwei gewöhnlichen Sammellinsen sehr starke Vergrößerungen erreichen. Freilich wirkt dabei die große Hitze, die im Brennpunktbilde der Sonne zugleich konzentriert wird, sehr störend, was übrigens auch mehr oder weniger die anderen Beleuchtungsarten bei Projektionen an sich haben. Zwischen die Lichtquelle und das Objekt schiebt man deshalb oft ein Gefäß mit einer Wärme absorbierenden, aber für das Licht durchlässigen Flüssigkeit, z. B. einer Alaunlösung.

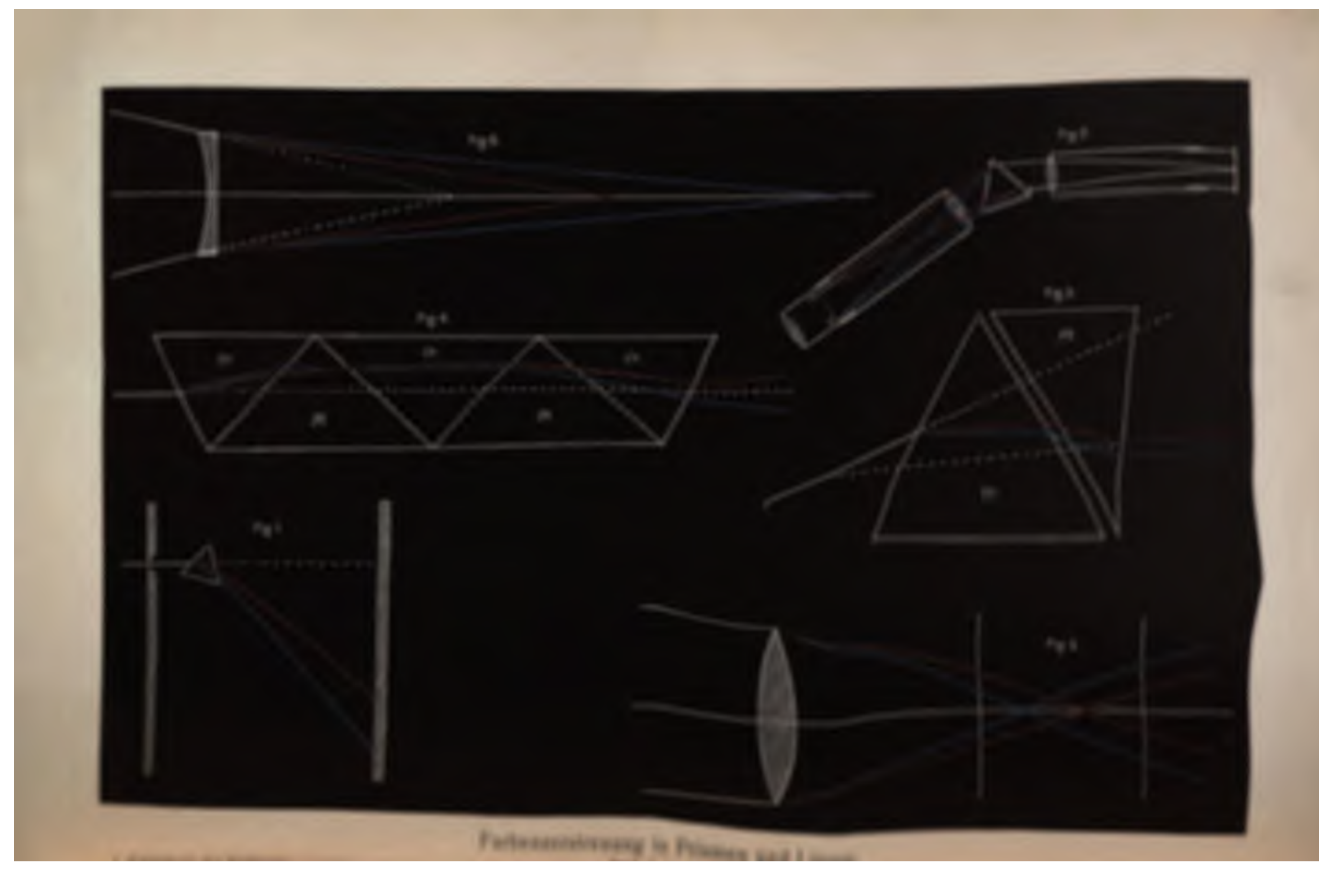


Zusammengesetztes Mikroskop. c Okular; o Objektiv; P Objekttisch mit Blendöffnung; s Spiegel und i Blendzylinder zur Beleuchtung des Objektivs. Vgl. Text, S. 232.

e) Die Farbenzerstreuung.

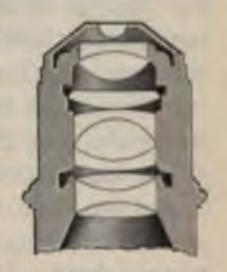
Alle die bisher ermittelten Wirkungen gebrochener Strahlen sind, so wie sie bisher dargestellt wurden, nur gültig für einfarbiges, monochromatisches Licht. Das weiße Licht ist aber nicht einfarbig, das zeigt ohne weiteres jeder der vorstehend geschilderten Versuche mit gebrochenen Strahlen. Wenn das Licht von einem weißen Gegenstande durch ein Prisma geht, so zeigt der Gegenstand farbige Ränder, die in der Reihe der Regenbogenfarben aufeinander folgen. In der beifolgenden Tafel „Farbenzerstreuung in Prismen und Linsen" ist dies in Figur 1 durch die beiden äußersten Strahlen, rot und blau, angedeutet. Diese können nur durch die Lichtbrechung aus dem weißen Licht entstanden, also Teile des weißen Lichtes sein. Ebensolche farbige Ränder haben alle Gegenstände, die man durch ein Fernrohr betrachtet, das in der oben beschriebenen Weise nur aus einfachen oder doch einer Kombination von Linsen zusammengesetzt ist, deren Glasarten das gleiche Brechungsvermögen haben.

Wie hier durch die Lichtbrechung Weiß in die Regenbogenfarben aufgelöst wurde, können wir auch durch ein einfaches Experiment die Regenbogenfarben wieder zu Weiß vereinigen. Auf einer Scheibe werden sektorenweise, wie Figur 1 der Tafel „Farbige Lichterscheinungen" bei



Farbenzerstreuung in Prismen und Linsen.

Seite 270 zeigt, jene Farben verteilt und die Scheibe nun in sehr schnelle Umdrehung versetzt, wobei sich die schnell wechselnden Farbeneindrücke in unserem Auge wieder zu Weiß vermischen. Bei unseren physiologischen Betrachtungen in der Einleitung haben wir schon bemerkt, daß keinerlei Sinneseindrücke mehr getrennt wahrgenommen werden können, die schneller als etwa eine Zehntelsekunde aufeinander folgen. Dies war auch der Grund, weshalb wir die schneller aufeinander folgenden Luftstöße nur noch vereint als Schallwirkung wahrnahmen. Hier vereinigen sich nun die Farbenwirkungen zu einem Lichtakkord, den wir Weiß nennen.



Linsenkombination im Objektiv eines Mikroskops. Vgl. Text, S. 232.

Die Erscheinung der farbigen Ränder in einem Prisma zeigt ohne weiteres, daß die verschiedenen Farben, aus denen Weiß besteht, an ein und derselben Grenzfläche verschieden stark gebrochen werden. Wir können uns davon leicht genauer unterrichten, indem wir nacheinander verschiedenfarbige Lichtstrahlen durch ein Prisma gehen lassen und ihren Brechungswinkel bei gleichem Einfallswinkel mit dem früher mehrfach benutzten Meßtisch bestimmen. Es ist zu diesem Zweck ein besonderes Instrument, das **Spektroskop**, erfunden worden, dessen Forschungsresultate zu den staunenswertesten Errungenschaften unserer modernen Wissenschaft zu zählen sind. Die Entdecker der Spektralanalyse sind die Heidelberger Forscher **Kirchhoff** und **Bunsen**.

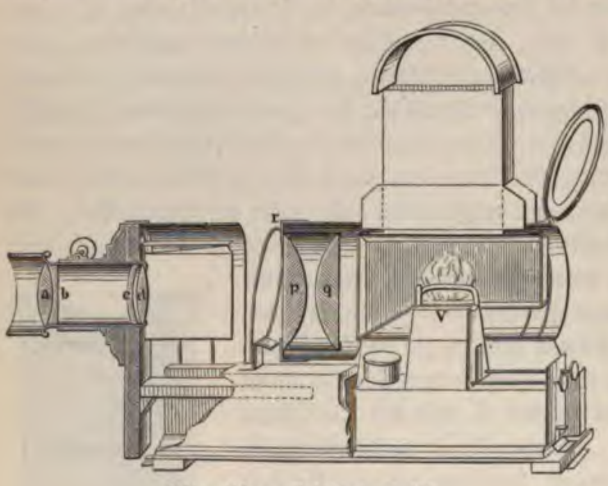
Das Spektroskop besteht im wesentlichen aus einem Glasprima P oder einer Kombination von mehreren derselben, wodurch dann die Farbenzerstreuung, die **Dispersion** des Apparates vergrößert wird (s. die Abbildung, S. 237). Um mit Hilfe des Prismas möglichst genaue Messungen des Brechungsvermögens verschiedener Lichtsorten vornehmen zu können, muß man dafür sorgen, daß ein möglichst scharf begrenzter Strahl von der zu untersuchenden Lichtquelle aus bekannter Richtung auf das Prisma fällt. Würde man den Querschnitt des Strahles punktförmig machen, so könnte in vielen Fällen sein Eindruck auf unser Auge zu schwach werden; man wählte deshalb eine Reihe von Punkten, eine gerade Linie, als Form des Lichtstrahles. Vor der Lichtquelle brachte man eine schmale Spaltöffnung bei F an, die im Brennpunkt einer gegen die erste brechende Fläche des Prismas gerichteten Sammellinse liegt. Durch diese Linse werden die vom Spalt herkommenden Strahlen durch das Rohr A parallel auf das Prisma geleitet, als ob sie aus unendlicher Ferne kämen. Nachdem die Spaltstrahlen das Prisma durchdrungen haben und in ihm gebrochen wurden (s. auch den Querschnitt auf nebenstehender Tafel, Figur 2), gelangen sie in ein Fernrohr B, dessen Objektiv dem Prisma zugewandt ist. Dasselbe vereinigt die parallelen Strahlen wieder in seinem Brennpunkte, so daß man durch sein Okular das gebrochene Bild des Spaltes beobachten kann. Um den Apparat zu Messungen geeignet zu machen, ist an demselben Tischchen, auf welchem sich mit dem Prisma das Spaltfernrohr, der sogenannte **Kollimator**, und das **Beobachtungsfernrohr** befinden, noch ein drittes Fernrohr C angebracht, das sein Objektiv der zweiten brechenden Fläche derart zuwendet, daß parallel von ihm ausgehende Strahlen von dieser Fläche reflektiert werden, mit den ausfallenden gebrochenen Strahlen zusammenfallen und so in das Beobachtungsfernrohr und das Auge gelangen. Im Brennpunkte jenes dritten Fernrohres ist eine auf Glas geritzte, beleuchtete Skala bei S aufgestellt, die durch



Linsenkombination im Okular eines Mikroskops. Vgl. Text, S. 232.

diese Anordnung zugleich mit dem Spaltbild im Auge erscheint und eine Ablesung gestattet, die die Lagenveränderungen verschiedener Strahlen gegeneinander, d. h. ihre verschiedenen **Brechungswinkel**, ermitteln läßt.

Bringen wir vor den Spalt eines solchen Spektroskops einen festen oder flüssigen Körper von beliebiger chemischer Zusammensetzung und erhitzen ihn mehr und mehr, so wissen wir, daß er von einer Temperatur von 525° an Licht auszusenden beginnt; er zeigt von hier an die erste Rotglut, die bei steigender Temperatur zunimmt. Im Spektroskop erscheint dann zuerst ein schmales rotes Spaltbild, das sich mehr und mehr nach der Seite hin ausbreitet, die weiter ab von der Richtung des ungebrochenen Strahles liegt. Aus dem schmalen Spaltbilde wird ein farbiges Band, das uns anzeigt, daß die bei steigender Temperatur von dem Körper ausgesandten Strahlen immer kräftiger gebrochen werden, während zugleich die zuerst ausgesandten Strahlen bestehen bleiben. Je höher also die Temperatur steigt, desto verschiedenartigere Lichtsorten werden zugleich ausgesandt. Dabei wird die Färbung der hinzukommenden Lichtsorten eine andere, sie geht mehr und mehr in Gelb über, wenn die Temperatur des strahlenden Körpers etwa 1000° erreicht; später kommt Grün, dann Blau und schließlich Violett hinzu, wenn bei etwa 1500° höchste Weißglut eingetreten ist. Das Farbenband, das **Spektrum** des strahlenden Körpers, zu welchem sich das Bild des Spaltes ausgebreitet hat, zeigt alle Regenbogenfarben hintereinander, in welche sich durch die Brechung in dem Prisma der in dasselbe eindringende weiße Strahl aufgelöst hat. Bei weiterer Temperaturerhöhung tritt zu diesen nun keine neue Farbe, oder überhaupt keine andere sichtbare Erscheinung hinzu, als daß alle Farben des Spektrums immer intensiver werden. Auf unserer Spektraltafel (bei S. 250) würde das unter Nr. 1 stehende Sonnenspektrum ohne seine schwarzen Linien ein einfaches kontinuierliches Spektrum darstellen.

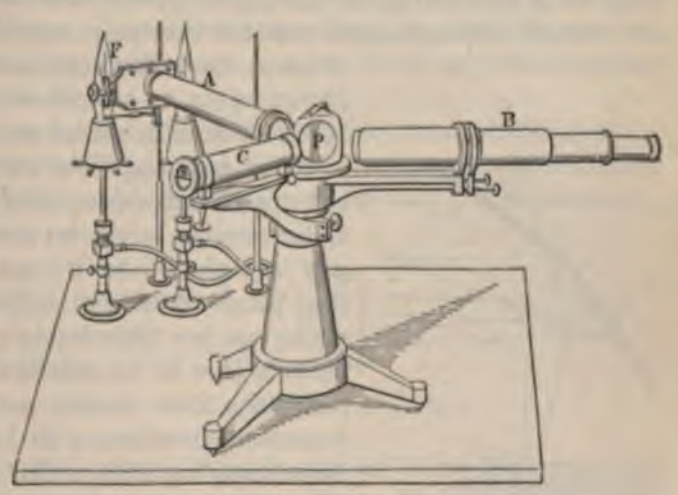


Skioptikon. Vgl. Text, S. 233.

Wir haben aus diesen Erfahrungen im Anschluß an frühere zunächst den Schluß zu ziehen, daß in einem festen oder flüssigen Körper von sonst beliebiger Beschaffenheit die Moleküle bei einer bestimmten Temperatur nicht nur mit einer bestimmten Geschwindigkeit schwingen, beziehungsweise umlaufen, sondern mit allen Geschwindigkeiten bis zu einer gewissen, durch die Temperatur angegebenen, Höhengrenze. Diese Schwingungen werden durch den Äther, die Uratome, übertragen und machen zwischen einer gewissen unteren und oberen Grenze auf unser Auge den Eindruck von Licht in seinen verschiedenen Farbenmischungen. Das rote Licht findet in den brechenden Substanzen den kleinsten, das violette den größten Widerstand: Violett ist brechbarer wie Rot. Unsere Erfahrungen über die Wärme haben uns keinen Zweifel darüber gelassen, daß die höheren Temperaturen gleichbedeutend mit schnelleren Schwingungen der Moleküle sind. In den violetten Lichtstrahlen müssen also, wenn der angenommene Zusammenhang zwischen

strahlender und innerer Wärme besteht, die Ätherschwingungen auch entsprechend schneller vor sich gehen, wie in den roten. Wie können wir nun hieraus den größeren Widerstand, den die violetten Strahlen gegenüber den roten in den brechenden Mitteln finden, mechanisch klarlegen?

Unser früher angewandtes Anschauungsmittel mit den Doppelrädchen (S. 216) gab uns hier bereits eine Erklärung. Wir sahen, daß die parallel in das rauhe Gebiet eindringenden Rädchen um so mehr zu divergieren beginnen, je größer die Achsenlängen zwischen den Rädchen sind. Diese Anschauung gibt freilich nur einen Fingerzeig, und wir müssen jetzt tiefer in das Wesen der Bewegungserscheinungen eindringen. Früher sahen wir, daß von den umschwingenden Molekularplaneten zurückgeworfene Ätheratome ausstrahlen, deren Strom nun die brechenden Substanzen durchdringt. Dabei ist ersichtlich, daß die aufeinander folgenden Ätheratome infolge der kreisenden Bewegung in den Molekülen eine Schraubenlinie bilden müssen, wenn man sie miteinander verbindet. Der Widerstand, welchen diese schraubenförmige Bewegung findet, muß aber offenbar von der Anzahl von „Schraubengängen" abhängen, welche in der gleichen Zeit einen Punkt des widerstehenden Mittels durchlaufen. Wird die Länge der Schraube von den in ihr sich bewegenden Teilchen stets in der gleichen Zeit zurückgelegt, mit anderen Worten, gebraucht jede Art von Licht in demselben Mittel die gleiche Zeit zu seiner Fortpflanzung, so muß diejenige Lichtsorte den größeren Widerstand finden, bei welcher die Schraubengänge kleiner sind. Übertragen wir den Vergleich mit der Schraube der einfacheren Anschauung wegen zunächst vom Raumbegriff auf den der Ebene, so verwandelt sich die Schraube in eine Wellenlinie, und wir sagen nun, diejenige Lichtsorte muß am stärksten gebrochen werden, welche die kürzeste Wellenlänge hat. Da es unser Bestreben ist, die gemachten Wahrnehmungen sobald als möglich in unsere allgemeinen Anschauungen vom Wesen der Erscheinungen einzureihen, wollen wir, ehe wir noch die weiteren Eigenschaften des farbigen Lichtes untersuchen, nach den Beweisen für seine wellenförmige Natur forschen.

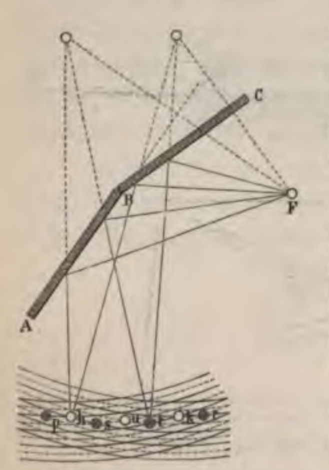


Bunsens Spektroskop. Vgl. Text, S. 235.

f) Die Wellentheorie des Lichtes.

Newton, der nicht nur als strenger Forscher die mathematischen Gesetze zu ergründen suchte, in denen das Naturgeschehen sich abspiegelt, sondern auch als Philosoph das innere Wesen der Erscheinungen erfassen wollte, konnte es sich nicht anders denken, als daß jenes unbekannte Etwas, das den Eindruck des Lichtes auf unser Auge hervorbringt, von dem leuchtenden Körper selbst ausströmen müsse; er erdachte die sogenannte Emanationstheorie des Lichtes. Durch die chemischen oder physikalischen Prozesse, welche den hohen Hitzegrad der leuchtenden Körper

verursachen, sollten Teilchen abgeschleudert werden und das Auge in geradliniger Richtung erreichen. Der Umstand, daß alle brennenden Körper sich allmählich zu verzehren scheinen, konnte schon für diese Ansicht sprechen, und auch alle übrigen, bisher besprochenen Eigenschaften des Lichtes ließen sich durch sie veranschaulichen. Unsere bisherigen Erklärungsversuche stehen durchaus selbst auf der Grundlage einer Emanationstheorie, nur daß wir statt der von den leuchtenden Körpern selbst ausgehenden Teilchen Ätheratome annehmen, die auf die in Wärmeschwingungen begriffenen Moleküle stoßen und von ihnen zurückgeworfen werden. Der Unterschied liegt nur darin, daß die Ätheratome Eigenschaften der schwingenden Moleküle mitnehmen, demnach neben der geradlinig fortschreitenden Bewegung noch eine andere aufweisen müssen, deren Natur wir zu ergründen haben. Die geradlinig fortschreitende Bewegung scheidet dabei für uns aus; sie ist es, welche nach unserer Ansicht die Gravitation bewirkt. Die übrigbleibende Bewegung ist danach eine wellenförmige und muß deshalb alle die Eigenschaften besitzen, die wir z. B. an schwingenden Saiten beobachtet haben. Untersuchen wir, ob dies zutrifft.



Fresnels Spiegelversuch zum Nachweis der Lichtwellen.

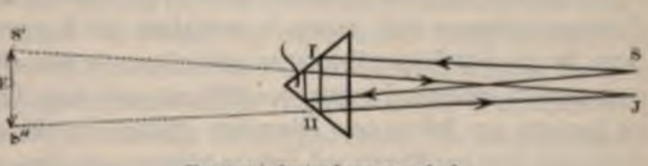
Von ausschlaggebender Bedeutung wurde die Erwägung, daß eine Wellenbewegung unter Umständen durch eine andere Wellenbewegung aufgehoben werden kann, wenn zwei Wellenzüge sonst ganz gleicher Art mit einem Phasenunterschied von einer halben Wellenlänge aufeinanderfolgen. Die Wellentäler werden von den Wellenbergen ausgefüllt. Wir haben die Erscheinung schon bei den Schallwellen behandelt und gesehen, wie zwei gleiche Töne einander vernichten können, und wie diese sogenannte Interferenz die stehenden Wellen bildet. Durch Hinzufügung von Licht zu Licht müssen wir Dunkelheit hervorbringen können, wenn das Licht wirklich eine Wellenbewegung ist.

Dies zu zeigen ist nun zuerst Fresnel gelungen (1824). Der hierzu dienende Versuch, der die Undulationstheorie des Lichtes begründete, hatte folgende Anordnung. Es war zunächst nötig, zwei Lichtquellen von gleicher Wellenlänge zu erhalten. Nach unserer durch die Lichtausbreitung mit einem Prisma erlangten Anschauung müßte völlig einfarbiges Licht nur eine bestimmte Wellenlänge haben. Diese Bedingung erfüllen gewisse glühende Dämpfe, wie wir später noch eingehender zeigen werden. Zum Beispiel verdampft aus Kochsalz in einer Spiritusflamme das darin enthaltene Natrium mit gelbem Licht, das sich als einheitlich, „monochromatisch“, erweist. Es ist von vornherein wahrscheinlich, daß die gesuchten Lichtwellen sehr klein sind und sehr schnell aufeinanderfolgen. Deshalb wird es nicht gelingen, die Wellenzüge von zwei verschiedenen Lichtquellen genau so aufeinander folgen zu lassen, daß sie um eine halbe Wellenlänge, d. h. voraussichtlich einen Bruchteil von einer tausendstel Sekunde, auseinander sind.

Fresnel half sich dadurch, daß er nur eine Lichtquelle F anwandte, diese aber von zwei Spiegeln, AB und BC, reflektieren ließ, die nur ganz wenig gegeneinander geneigt sind (s. die obenstehende Abbildung). Die reflektierten Strahlen wurden von einem Schirm aufgefangen, wobei auf jeden Punkt desselben ein Strahl von dem einen und einer von dem anderen Spiegel trafen. Der Weg beider Strahlen ist wegen der Neigung der Spiegel gegeneinander um ein geringes verschieden, und zwar um so mehr, je schräger die Strahlen von den Spiegeln zurückgeworfen

werden. Ist das Licht eine Wellenbewegung, so müssen auch infolge dieser verschiedenen Wege an bestimmten Stellen des Schirmes Wellen von den beiden Spiegeln zusammentreffen, die um eine halbe Wellenlänge verschieden sind, z. B. in den Punkten p, s, t, r. Diese heben ihre Wirkung gegenseitig auf, während dicht daneben zwei Wellenberge auftreten und in den Punkten h, u, k ihre Lichtwirkung verdoppeln. Es bilden sich stehende Wellen, wie wir sie bereits früher (S. 96) auf einer durch zwei hineingeworfene Steine bewegten Wasserfläche beobachteten. Wenn das Bild der Natriumflamme als eine durch einen Spalt dargestellte Lichtlinie erzeugt wird, so entstehen auf dem Schirm des Apparats helle und dunkle Linien, die sogenannten „Interferenzstreifen". Bei entsprechender Anordnung des Versuches, welche der ungemeinen Kleinheit der Lichtwellen Rechnung trägt, kann man tatsächlich durch eine Lupe diese Streifen unzweifelhaft erkennen. Damit ist der strenge Beweis für die Wellennatur des Lichtes gegeben; nach den entwickelten Anschauungen über das Wesen der Wärmestrahlung konnten wir dies auch nicht anders erwarten.

Neuerdings hat Martens die Totalreflexion bei diesem Versuch verwendet. Sind I und II in der nebenstehenden Abbildung zwei Flächen eines Prismas, deren Kantenwinkel nur sehr wenig von einem rechten abweichen, im vorliegenden Falle nur um etwa $2^1/_2$ Bogenminuten, so wird von einem Strahlenbündel, das von dem Spalt S ausgeht, ein Strahl von I nach II reflektiert und wieder nahezu nach seinem Ausgangspunkt zurückgeworfen werden, ein anderer Strahl dagegen den umgekehrten Weg von II nach I nehmen. Beide kommen auf einem Wege von etwas verschiedener Länge in J zusammen und interferieren hier. Bei der Beobachtung scheinen die beiden Strahlen von S' und S'' herzukommen, und die Entfernung E steht dann in einem ganz bestimmten Verhältnis zu der Wellenlänge des angewandten Lichtes, welche somit dadurch gemessen werden kann.



Martens Interferenzversuch.

Die in jedem besonderen Falle beobachtete Entfernung der Interferenzstreifen voneinander gibt offenbar ein Maß für die Größe der Lichtwellen selbst. Wir wissen ja, daß der Weg der beiden Lichtstrahlen, die von den Fresnelschen Spiegeln her ein und denselben Punkt des auffangenden Schirmes treffen, zwischen einem und dem nächsten Wellentale, d. h. zwischen je einem der Interferenzstreifen, um eine Wellenlänge verschieden sein muß. Der gegenseitige Abstand dieser Streifen, die Länge des Lichtweges von der Quelle bis zum Schirm, der Winkel zwischen den beiden Spiegeln, sind allein nötig, um, unabhängig von irgend einer anderen Voraussetzung, als daß das Licht eine Wellenbewegung ist, die Größe dieser Wellen bestimmen zu können. Man gelangt dabei zu ungemein geringen Größen. Die Wellen, welche das gelbe Licht der zu unseren Versuch angewandten Natriumflamme aussendet, haben nur eine Länge von 589 Millionenteilen eines Millimeters (589 $\mu\mu$). Die ersten unserem Auge als Licht erscheinenden Wellen am roten Ende des Spektrums haben eine Länge von 770 $\mu\mu$, die letzten noch als violett wahrnehmbaren Strahlen sind etwa halb so lang. Das Gemisch von Wellen, welches ein weißglühender Körper aussendet, umfaßt also nur eine Oktave, soweit das Auge die Wellen als Licht zu empfinden vermag. Die Grenzen, die physiologisch der Aufnahmefähigkeit des Auges gesteckt sind, sind viel enger, als sie für das Ohr nachgewiesen werden

konnten. Es ist indes anzunehmen, daß diese Beschränkung ganz besondere Vorteile bietet. Für den Gesichtssinn kommt es hauptsächlich darauf an, möglichst eindeutige Eindrücke zu empfangen, eine Bedingung, die durch die Wahrnehmbarkeit von mehreren Lichtoktaven, in denen sich die gleichen Farben wiederholen, beeinträchtigt werden müßte.

Die allgemeinen Eigenschaften der Wellen, welche wir bei schwingenden Saiten bereits kennen lernten, müssen für alle Wellenbewegungen gelten. Seinerzeit haben wir, um dies unzweifelhaft zu machen, die Saiten uns in ihre einzelnen Elemente getrennt gedacht, sowie wir jetzt die fortschreitenden Ätheratome sich zu einer wellenförmigen Kette im Geiste zusammenfügen sehen. Insbesondere muß auch die auf Seite 144 gefundene Beziehung zwischen der Wellenlänge und der Schwingungszahl, nämlich $N = \frac{v}{\gamma}$, wo v die Geschwindigkeit der Fortpflanzung, γ die Wellenlänge ist, für die Ätherwellen gelten. Für die längsten, die roten Lichtwellen, erhalten wir aus dieser Formel für N rund 390 Billionen Schwingungen in der Sekunde; das violette Licht schwingt noch einmal so schnell. Wir gelangen hier zu Zahlen, mit denen wir ebenso wenig Begriffe verbinden können wie mit denen, die die Dimensionen der Himmelsräume ausmessen, und die wir doch mit jenen in Bezug auf ihre Bewegungen für vergleichbar erachten. Wenn unsere vorangegangenen Betrachtungen hierüber richtig sind, müssen die molekularen Planeten Umlaufszeiten um ihre Schweremittelpunkte haben, die gleich jenen Schwingungsdauern sind, sobald sie wenigstens die Temperaturen angenommen haben, bei denen sie die betreffenden Lichtsorten aussenden. Es gibt also Weltsysteme, deren Glieder in einer einzigen Sekunde Hunderte von Billionen mal ihren Mittelpunkt umkreisen, und andere, die Hunderte von Jahren dazu gebrauchen. Mitten in dieser unfaßbar großen Stufenleiter des Geschehens steht der Mensch und sucht das Ganze nach oben- und untenhin zu erfassen. Denken wir uns intelligente Wesen auf jenen molekularen Planeten, so würden für sie die schnellsten, menschlich noch übersehbaren Bewegungen ganze Ewigkeiten dauern, denn für sie ist ja eine menschliche Sekunde 400 Billionen Jahre lang, das ist vielleicht eine Million mal mehr, als die ganze Entwickelungsgeschichte der Erde in Anspruch genommen hat.

Zwischen den schnellsten Schwingungen, die wir bei den Schallwellen kennen lernten, und die sich auf höchstens 90,000 in der Sekunde bezifferten, und den ersten Lichtwellen besteht eine ungeheure Kluft, die in der Natur zweifellos ausgefüllt ist. Im übrigen dürfen wir nicht vergessen, daß die Schallwellen in einem ganz anderen Mittel sich ausbreiten als die des Lichtes: Ätherwellen von der gleichen Schwingungszahl, wie die der Schallwellen, können neben diesen hergehen und dabei ganz andere Wirkungen haben als diese. Es ist also das gesamte Gebiet von dem Nullpunkte der Bewegung bis zu der untersten Lichtschwingungszahl noch auszufüllen. Hier liegt das Bereich der strahlenden Wärme, soweit ihre Grade unter der Rotglut bleiben.

g) Die Spektralanalyse.

Wir kehren nach dieser Abschweifung, die uns das Wesen des Lichtes als eine Wellenbewegung kennzeichnete, zu der Zerlegung desselben in seine einzelnen Farben, Lichttöne, wie wir nun sagen können, vermittelst des Spektroskops zurück.

Jeder weißglühende Körper sendet alle Lichtsorten, d. h. alle Wellenlängen zwischen den vorhin angegebenen Grenzen aus: er hat ein ununterbrochenes, ein kontinuierliches Spektrum.

Dies spektroskopische Verhalten erweist sich als eine ganz allgemeine Eigenschaft des festen und flüssigen Aggregatzustandes aller Körper. Der in so vieler Hinsicht sich physikalisch absondernde gasförmige Zustand der Stoffe dagegen zeigt ein wesentlich anderes Verhalten

in ihren Lichtschwingungen. Auf ihrer Untersuchung bauen sich die wunderbaren Erfolge der spektralanalytischen Forschung auf. Bei dem Fresnelschen Fundamentalversuch wurde das Licht des Natriumdampfes bereits erwähnt, das wir für einfarbig gelb erklärten. Eine solche Natriumflamme vor den Spalt eines Spektroskops gebracht, zeigt, wenigstens solange nicht ungewöhnliche instrumentelle Mittel angewendet werden, an Stelle des vielfarbigen Bandes nur eine einzige in gelbem Lichte leuchtende Linie, die an derselben Stelle steht, wo in dem ununterbrochenen Spektrum sich diese Farbe befindet. (S. die Spektraltafel, S. 250.) Glühender Natriumdampf sendet also nur Licht von einer ganz bestimmten Wellenlänge aus, ebenso wie eine Saite von bestimmter Spannung auch nur immer ein und denselben Ton erzeugt. Alle glühenden Natriumatome haben folglich (mit der oben angedeuteten Einschränkung) nur eine einzige Umlaufsgeschwindigkeit ihrer molekularen Systeme.

Aus unserer wärmetheoretischen Anschauung ist dies zu erklären. Natrium kann natürlich jede Temperatur annehmen und würde, sobald es in Rotglut kommt, auch rote Strahlen aussenden. Aber bei dieser Temperatur verdampft bereits so viel von dem Stoff, daß die gelben Strahlen des Dampfes weit „übertönen", wenn wir wieder einen Vergleich mit den Schallerscheinungen anwenden. Die gelbe Linie erscheint im Spektroskop über einem schwachen kontinuierlichen Spektrum, dessen Ausdehnung sich nach dem Hitzegrade des noch nicht dampfförmigen Natriums richtet. Nun haben wir gesehen, daß bei festen und flüssigen Körpern das gelbe Gebiet des Spektrums erst bei Temperaturen über 1000° auftritt, während die gelbe Natriumlinie bereits bei weit geringeren Temperaturen erscheint. Dabei ist der Unterschied zwischen Temperatur und strahlender Wärme wohl ins Auge zu fassen. Im vorangegangenen Kapitel wurden die Wärmeerscheinungen durch molekulare Bewegungen erklärt, die in der Größe der Bahndurchmesser und ihrer Geschwindigkeit ein Maß finden. Das Spektroskop beweist nun, daß die Atome des Natriumdampfes im Molekül nur eine einzige immer gleichbleibende Umlaufszeit haben, und daß die Temperatur dieses Dampfes nur die Ausdehnung der Bahnen verändert. Anders ist es bei festen oder flüssigen Körpern. In diesem Zustande ist die freie Beweglichkeit beeinträchtigt, so daß durch die gegenseitigen Störungen auch geringere Umlaufszeiten möglich werden.

Das Spektroskop enthüllt die merkwürdige Tatsache, daß die freien Gasmoleküle eines jeden Körpers Weltsysteme bilden, deren einzelne Glieder für jeden chemischen Stoff verschiedene, aber ganz bestimmte Umlaufszeiten haben. Jedes glühende Gas zeigt ein sogenanntes **Linienspektrum**, das indes nicht, wie wir es vom Natrium anführten, nur aus einer Linie, sondern bei vielen Stoffen aus einer sehr großen Anzahl von Linien besteht, die aber im Spektroskop stets durch dunkle Räume getrennt sind. Auch das Spektrum des Natriums zeigt, streng genommen, nicht nur eine Linie. Bei Anwendung von Prismenanordnungen, die die Farben sehr stark zerstreuen, zerfällt jene gelbe Linie in zwei nahe beieinander liegende Streifen, die sich in Serien wiederholen. Auf der Tafel bei Seite 250 sind eine Reihe von Linienspektren verschiedener Stoffe nach **Erdmann** abgebildet. Da das Licht, welches diese Linien erzeugt, direkt von den betreffenden Lichtquellen ausgestrahlt wird, redet man in diesem Falle auch von **Emissionsspektren**.

Das Spektrum des Eisens weist 4500 gemessene Linien auf, und viele andere Stoffe zeigen ähnlich komplizierte Erscheinungen. Haben wir hieraus zu schließen, daß jede dieser vielen verschiedenen Wellenlängen etwa einem besonderen molekularen Planeten, der eine nur ihm zukommende Umlaufszeit hat, angehört? Jene allerkleinsten Weltsysteme wären dann

teilweise bedeutend reicher an Einzelkörpern als die uns bekannten Welten im Himmelsraum, wenn wir nicht bei unserem eigenen Sonnensystem auch alle die kleinen Planeten mitzählen wollen. Das Eisenspektrum z. B. zeigt nicht bloß eine kleine Anzahl besonders heller, sondern auch daneben sehr viele ganz schwache Linien, die zur Erscheinung kämen, wenn wir diejenigen Ätherwellen spektroskopisch untersuchen könnten, die von unserem Sonnensystem durch die Bewegungen seiner Planeten und Monde in den Weltraum ausgesandt werden. Es sind dieselben Ätherwellen, die von den molekularen Systemen ausgehen, nur sind ihre Wellenlängen nach Millionen von Kilometern statt nach Millionstel Millimetern zu messen.

In Wirklichkeit bedarf jedoch unser Schluß von dem Reichtum der Spektrallinien auf den der molekularen Weltsysteme einer wesentlichen Einschränkung, die sich aus unseren Erfahrungen über das Spiel der Schallwellen ohne weiteres ergibt. Wir machten damals die Wahrnehmung, daß ein Grundton eine Anzahl von Obertönen hervorruft, daß also der Hauptwellenzug stets durch eine Reihe von Kräuselungen kleinerer Wellen verziert ist, die dem Grundton seinen besonderen Charakter, seine Tonfärbung geben. Die gleiche Eigenschaft haben auch die Lichtwellen: es tönen gewissermaßen Lichtterzen, -Quinten &c. mit, wenn der Grundton stark genug angeschlagen wird. Bei dieser Entstehungsweise der schwächeren Linien eines komplizierten Spektrums treten ihre Wellenlängen in ein einfaches mathematisches Verhältnis zueinander, wie es bei den Schallwellen der Fall ist. Ferner erscheinen bei Steigerung der Leuchtkraft der Quelle immer mehr schwache Linien, und unter besonderen Umständen werden auch diese Linien der Lichtobertöne ebenso ungewöhnlich verstärkt, wie man durch Resonatoren von besonderer Form die musikalischen Obertöne hervorhob.

Alles dies trifft nun in überraschender Weise auch für die Spektren der Gase zu. Wir beginnen mit dem Spektrum des Wasserstoffes. Schwach erhitzt, zeigt dieses allgegenwärtige Element im Spektroskop nur drei Linien, aber schon bei etwas höherer Temperatur nimmt die Zahl derselben zu, und es zeigt sich, daß die Wellenlängen aller dieser Linien durch die Formel $\frac{364{,}542\ m^2}{(m^2-4)}$ dargestellt werden, in der für m eine der unten in der ersten Reihe angegebenen ganzen Zahlen einzusetzen ist. Man erhält aus der Formel durch Rechnung die in zweiter Linie stehenden Wellenlängen in Millionstel-Millimetern; in der dritten Zahlenreihe sind die beobachteten Werte der betreffenden Linien angegeben.

m	berechnet	beobachtet	m	berechnet	beobachtet
3	656,18	656,21	10	379,73	379,73
4	486,08	486,07	11	377,00	376,99
5	433,98	433,95	12	374,96	375,02
6	410,11	410,12	13	373,38	373,41
7	396,95	396,92	14	372,14	372,11
8	388,84	388,81	15	371,14	371,12
9	383,48	383,49			

Die drei ersten der hier angeführten Linien, die den berechneten Wellenlängen für m = 3, 4 und 5 entsprechen, sind zugleich die hellsten im Spektrum des Wasserstoffs. Ebenso treten die den kleinsten einfachen Verhältnissen entsprechenden Obertöne immer am kräftigsten hervor. Die höheren Verhältniszahlen als 5 zugehörigen Linien sind bei Anwendung des gewöhnlichen Spektroskops schon nicht mehr zu erkennen. Aus der Nebeneinanderstellung der berechneten und der beobachteten Werte erhellt die völlige Übereinstimmung zwischen den Tatsachen und der Theorie. Die Abweichungen betragen nur einige Hundertteile eines Millionstel-Millimeters und bleiben durchaus in den Grenzen der unvermeidlichen Beobachtungsfehler. Gleichzeitig

erkennen wir aus dieser Übereinstimmung, bis zu welcher erstaunlichen Genauigkeit es die moderne Beobachtungskunst gebracht hat.

Alle hier zusammengestellten Wellenlängen liegen in ein und derselben Oktave. Das ist nicht anders möglich, weil wir vorläufig nur von einem sichtbaren Spektrum reden, dessen ganze Ausdehnung ja nur eine Oktave umfaßt. Gegenüber unseren an den musikalischen Tönen gemachten Erfahrungen ist die Zahl der erkennbaren Obertöne bei den Lichtwellen weit größer. Das Auge ist innerhalb der ihm gesteckten engeren Grenzen viel empfindlicher als das Ohr und hat insbesondere das wunderbar feine Hilfsmittel des Spektroskops zur Zerlegung der vielverschlungenen Lichtakkorde. Ein verwandtes Werkzeug fehlt noch für die Untersuchung der Schallwellen.

In der Anordnung der aufgeführten Linien des Wasserstoffs tritt eine eigentümliche Gruppierung hervor. Die Linien treten immer näher aneinander, je mehr sie sich dem violetten Ende des Spektrums nähern, je kleiner also die Wellenlängen selbst werden. Bei der weiteren Berechnung der Linien, welche höheren ganzen Zahlen entsprechen als 15, findet man, daß sie sich immer enger aneinander drängen, bis bei $m = \infty$ die Wellenlänge 364,542 erreicht ist. Hier kommen unendlich viele Linien zusammen. Wären sie lichtstark genug, um überhaupt noch sichtbar zu sein, so müßten sie schon weit vor dieser Grenze so nahe beieinander stehen, daß sie nicht mehr getrennt erscheinen; sie würden also den Eindruck eines ununterbrochenen Spektrums machen, das aber mit der Wellenlänge 364,542 abschneidet. Viele Stoffe, die in eine ganz bestimmte chemische Klasse gehören, zeigen nun tatsächlich eine solche Anordnung der Spektrallinien, wie sie beim Wasserstoff wegen Lichtschwäche nicht mehr gesehen, sondern nur errechnet werden kann. Es tritt auf diese Weise das sogenannte Bandenspektrum auf (siehe z. B. in der Spektraltafel auf S. 250 das Spektrum des Barium), das sich aus einer Reihe von Streifen zusammensetzt, die auf der einen Seite scharf begrenzt sind, auf der anderen aber sich ganz allmählich verlieren. Zuweilen erkennt man noch die einzelnen Linien, aus denen die Streifen offenbar bestehen; meist aber erscheint das Spektrum zusammenhängend, soweit die betreffende Bande reicht, nur daß sich die Lichtstärke schnell verliert, um bei der nächsten Bande plötzlich wieder einzusetzen. Die Bildung solcher Spektren ist aus jenen Serien von Lichtobertönen leicht zu verstehen.

Auch eine andere merkwürdige Tatsache scheint sich aus solchen Serienbildungen zu erklären. Bei sehr starker Erhitzung gewisser Gase, die durch hohe Spannungen des durchschlagenden elektrischen Funkens, besonders beim Wasserstoff, entsteht, erscheinen nicht nur die neuen Linien, sondern es beginnen die schon vorhandenen, die bei zunehmender Wärme immer heller wurden, sich zu verbreitern, bis sie endlich den ganzen Raum bis zur nächsten Linie ausfüllen, so daß ein ununterbrochenes Spektrum entsteht. Diese Gase verhalten sich also bei großer Hitze wie feste Körper oder Flüssigkeiten. Ein Vergleich aus dem Gebiete der Akustik wird auch dies anschaulich machen. Ein bestimmter Ton, der auf die freien Saiten eines Klaviers einwirkt, regt außer der ihm entsprechenden Saite auch noch die der zugehörigen Obertöne an. Es entsteht ein Linienspektrum in Tönen. Wenn aber jener Grundton mit unmäßiger Stärke, z. B. aus einer Posaune auf den Resonanzboden des Klaviers, eindringt, so werden seine sämtlichen Saiten zu schwingen beginnen, und aus dem allgemeinen Geräusch wird man keinen besonderen Ton mehr heraushören: es entsteht ein kontinuierliches Tonspektrum. Ebenso stören die Wellen stark erhitzter Gase sich gegenseitig, so daß ihre großen Wellenberge und -Täler sich verschlingen und alle sichtbaren Wellenlängen im Spektrum erscheinen.

Beim Wasserstoff und einigen anderen chemischen Elementen kommt man mit der Annahme eines einzigen Molekularplaneten scheinbar aus, dessen Umschwungsbewegung zugleich alle Wellenlängen der Ätherschwingungen erregt, für welche wir die Linien im Spektrum sehen. Dies ist nicht bei allen Elementen der Fall. Aber jedenfalls übersieht man schon heute, trotzdem die Untersuchungen über diese interessanten Verhältnisse noch sehr jungen Datums sind, daß man mit einer verhältnismäßig geringen Anzahl von Gliedern für jene molekularen Weltsysteme auskommen kann und sie in dieser Hinsicht mit den großen Planetensystemen durchaus vergleichbar sind. Bei der Besprechung der Beziehungen des Spektrums zur chemischen Natur der Stoffe kommen wir hierauf zurück.

Auf eine sehr merkwürdige Ähnlichkeit deuten die Spektren mit nahen Doppellinien hin, wie wir sie beim Natrium kennen lernten. Die Wellenlängen der beiden Linien stehen nicht in einer Beziehung, welche die eine als Oberton der anderen kennzeichnete. Sie sind selbständig, müssen also von zwei verschiedenen umschwingenden Molekularkörpern herrühren, die

Abhängigkeit der Spektren von den Atomgewichten.

nicht vollkommen, aber nahezu gleiche Umlaufszeiten haben. Die gleiche Beobachtung macht man an den Planeten und ihren Monden. Die Erde mit ihrem verhältnismäßig großen Begleiter erregt, ins Mikroskopische übersetzt, durch ihren Umschwung ähnliche Paare von Ätherwellen. Durch den doppelten Grundton des Natrium-Spektrums werden Obertöne ausgelöst, d. h. es zeigt noch andere Linien, die sich alle als doppelt erweisen. Für die zweite Linie der Serie jenes Spektrums trifft dies zu; andere Linien desselben, die man mit der Theorie übereinstimmend an dem berechneten Orte gefunden hat, sind zu schwach, um ihren doppelten Charakter erkennen zu können. Es genügt aber durchaus jene zweite doppelte Linie, um die Natur des Natrium-Moleküls als Weltsystem mit einem Doppelplaneten zu kennzeichnen.

Aber nicht nur die Linien ein und desselben Spektrums zeigen untereinander jene merkwürdigen Gesetzlichkeiten, die uns einstmals einen tiefen Blick in jenes wunderbare Universum der Atome gestatten wird, sondern es sind auch Beziehungen zwischen den Spektren voneinander verschiedener Elemente nachweisbar, die ihre Abhängigkeit von dem Atomgewicht, d. h. der Masse der umschwingenden Einzelkörper, verrät. Wir geben oben eine Reihe von Spektren mit den Atomgewichten der betreffenden Stoffe wieder und sehen deutlich, wie die Linienserien bei wachsendem Atomgewicht mehr und mehr nach der roten Seite hinrücken, daß ihre molekularen Glieder also um so langsamer umschwingen, je mehr Masse zu bewegen ist. Es herrscht völlige Übereinstimmung mit den Erfahrungen in der makroskopischen Welt. Freilich bedürfen diese

vergleichbare Tonwirkung läßt sich im Gebiete des Schalles kaum erzielen. Wenn man auf einem Klavier, auf dem eine Geige liegt, zugleich alle Tasten anschlägt, hört man die Saiten der Geige zwar nachtönen, aber diese Erscheinung entspricht einem Emissionsspektrum, weil ja eben die Saiten selbst tönend werden, den Ton emittieren. Die entsprechende Wirkung würde auf dem Gebiete des Lichtes in Erscheinung treten, wenn man kalten Natriumdampf durch die strahlende Wärme eines weißglühenden Körpers erhitzt, bis er selbstleuchtend wird. Er wird dann allein sein helles Linienspektrum zeigen. Ein dem Absorptionsspektrum vergleichbares Tonbild wird aber geschaffen, wenn bei fortdauerndem Tönen aller Saiten eines Klaviers diejenigen Töne im ganzen weniger stark als die übrigen klingen, die von den Saiten einer daneben ruhenden Geige hervorgebracht werden, wenn diese selbst tönen. Theoretisch muß dies zweifellos eintreten, denn durch die Resonanzwirkung, die die Geige zum Tönen bringt, wird den entsprechenden Saiten des Klaviers mehr Energie entzogen als den anderen; nur ist unser Ohr in dem Gewirr des „kontinuierlichen Tonspektrums" nicht im stande, die einzelnen Töne wahrzunehmen. Ein Spektroskop für Töne ist noch nicht erfunden.

Aus dem Vorangegangenen geht hervor, daß die Absorptionslinien im Spektrum nicht vollkommen schwarz, d. h. lichtlos sein können, denn die Moleküle der Gashülle schwingen ja auch entsprechend ihrer Temperatur. Wäre diese gleich der des Kernes, so fände überhaupt keine Absorption statt. Die größere oder geringere Dunkelheit der Absorptionslinien kann deshalb ein Maß geben für die Temperaturdifferenz zwischen Kern und Hülle.

Es ist erwähnt worden, daß Luftwellen von weit höherer Schwingungszahl vorhanden sind, als dem höchsten hörbaren Tone entsprechen. Beim Licht wiederholten sich bisher alle Erscheinungen, welche wir beim Schall kennen lernten, und wir wissen, daß die Wellen der strahlenden Wärme ganz allmählich durch Steigerung der Schwingungszahl in rotes Licht übergehen. Somit können wir von vornherein annehmen, daß auch auf der violetten Seite des Spektrums der bis dahin ununterbrochen fortschreitende Zug der Ätherwellen nicht wirklich abbricht, wo die Empfindlichkeit unseres Auges ihm eine subjektive Grenze setzt, sondern daß es auch noch kleinere Wellen, kürzere Umlaufzeiten gibt als die, welche jenem äußersten sichtbaren Violett zukommen. Und in der Tat, wie es „infrarote", d. h. Wärmestrahlen gibt, so ist es auch gelungen, „ultraviolette" Strahlen nachzuweisen. Es war dies nur mit Hilfe einer merkwürdigen Eigenschaft gewisser Substanzen möglich, die einen Teil des eingestrahlten Lichtes nicht, wie wir es bisher beobachteten, in Wärme, sondern wieder in Licht verwandeln; es sind dies die sogenannten fluoreszierenden Körper, mit denen wir uns später (S. 285) noch näher zu beschäftigen haben. Durch die Absorption wird bei diesen nicht die Größe der molekularen Bahnen, die den Temperaturgrad bestimmt, sondern die Schwingungszeit vermindert; Licht von höheren Wellenlängen geht in solches von geringeren über, mit anderen Worten, durch die Absorption bei Fluoreszenz geht die eingestrahlte Farbe in eine solche über, die um ein Gewisses weiter nach der mehr brechbaren, d. h. der roten Seite mit kleineren Schwingungszahlen verschoben ist. Gelb wird Rot, Grün zu Gelb, und also auch „Ultraviolett" zu Violett: die unsichtbaren Strahlen werden sichtbar gemacht. Man bedient sich dazu gewöhnlich eines mit Bariumplatincyanür bestrichenen Schirmes, einer Substanz, die auch für die Sichtbarmachung der Röntgenstrahlen (vgl. S. 398) verwendet wird. Ist nur die eine, etwa die obere Seite eines Papierschirmes mit diesem Stoffe bestrichen, so wird ein sich über beide Teile breitendes Spektrum oben größere Ausdehnung haben als das von dem unpräparierten Papier zurückgeworfene, und der ganze übergreifende obere Teil ist violett gefärbt.

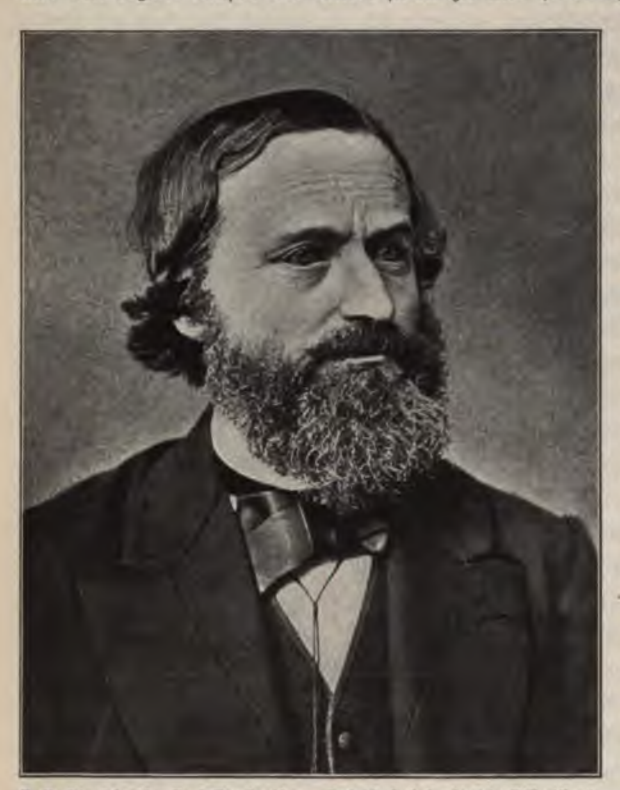
Bei der Untersuchung dieses ultravioletten Teils durch das Spektroskop darf man sich keines gewöhnlichen Prismas aus Glas bedienen, da es sich herausgestellt hat, daß Glas diese schnellschwingenden Strahlen stark absorbiert. Dagegen besitzt Quarz diese störende Eigenschaft nicht. Das Studium dieser unter gewöhnlichen Umständen unsichtbaren Lichtstrahlen durch ein Quarzprisma weist jenseits des Spektrums der sichtbaren Lichtschwingungen noch mindestens eine weitere Oktave und in derselben eine Fortsetzung der Linienserien nach. Dieselbe Erscheinung kann man auch in dem infraroten Wärmespektrum beobachten (s. Langleys Wärmespektrum, bei S. 196). Alle die Gesetzlichkeiten, die man für die gegenseitige Lage der Linien im sichtbaren Teile des Spektrums gefunden hat, zeigen sich auch zu beiden Seiten desselben. Man kann sehr oft schon vorher angeben, an welcher Stelle man in den unsichtbaren Teilen des Spektrums eine Linie zu suchen hat, und findet sie dort stets, wenn die Kraft der Beobachtungsmittel dazu ausreicht.

Die ultravioletten Strahlen haben verschiedene sehr merkwürdige Eigenschaften, die sie von den anderen unterscheiden. Ihre höchst seltsamen, erst in neuerer Zeit entdeckten Einwirkungen auf elektrische Erscheinungen können wir hier noch nicht behandeln. Dagegen mögen an dieser Stelle schon ihre chemischen Wirkungen erwähnt werden. Es ist bekannt, daß das Licht chemische Prozesse auslöst, wodurch allein die Herstellung von photographischen Bildern möglich wird. Gewiße Substanzen, insbesondere die Silbersalze, haben die Eigenschaft, vom Lichte zersetzt zu werden, wodurch metallisches Silber niederschlägt, welches eine Nachbildung von dem optischen Bilde schafft, das die betreffende Linse entwirft. Inwieweit chemische Erscheinungen in Betracht kommen, kann erst später erörtert werden. Hier interessiert es uns, zu erfahren, daß diese Wirkungen am schwächsten von den roten Strahlen, am stärksten von den ultravioletten erzielt werden. Da also die ultravioletten Strahlen die *chemisch wirksamsten* sind, so kann man das unsichtbare ultraviolette Spektrum doch geradeso photographisch aufnehmen wie das sichtbare, ja zum Teil mit besserem Erfolg. Dies ist in der Tat der Weg, auf dem man diesen sehr wichtigen Teil des Spektrums untersucht.

Die in allen verschiedenen Teilen des Spektrums auftretenden hellen oder dunkeln Linien oder Banden bleiben für ein und denselben chemischen Stoff immer an derselben Stelle. Sie bieten deshalb offenbar ein vortreffliches Mittel, das Vorhandensein solcher Stoffe nur durch die Betrachtung ihrer glühenden Dämpfe in einem Spektroskop nachzuweisen. Dies ist in den sechziger Jahren des neunzehnten Jahrhunderts zuerst von *Kirchhoff* und *Bunsen* (s. die Abbildungen, S. 248 und 249) unzweifelhaft nachgewiesen worden, die dadurch die Begründer der *Spektralanalyse* geworden sind, einer jungen Wissenschaft, die von allen physikalischen Entdeckungen der letzten Jahrzehnte bei weitem die größten und weittragendsten Erfolge aufzuweisen hat. Zunächst zeigt es sich, daß diese neue Methode für den qualitativen Nachweis von Stoffen sehr viel empfindlicher ist als irgend eine chemische. So genügt z. B. der dreimillionste Teil eines Milligramms Natrium, um die gelbe Linie desselben erscheinen zu lassen. Das Natrium ist eins der Bestandteile des Kochsalzes, und da von den Winden fast immer etwas von dem im Meerwasser enthaltenen Salze auch in die über den Kontinenten lagernden Luftschichten getragen wird, so ist die Natriumlinie fast bei jeder spektralanalytischen Untersuchung gegenwärtig. Diese große Empfindlichkeit der Spektralanalyse hat zu Entdeckungen von Stoffen geführt, die nur in ganz geringen Mengen anderen Stoffen beigesellt sind und sich zuerst durch Linien verrieten, deren Wellenlängen mit keiner Linie eines bis dahin bekannten Stoffes übereinstimmten. Auf diesem Wege wurden die sehr seltenen chemischen Elemente Rubidium, Cäsium, Thallium,

Indium, Gallium, Germanium, Skandium, Samarium und Helium entdeckt. Auch bei der Auffindung der erst jüngst bekannt gewordenen Beimengungen der atmosphärischen Luft, wie des Argon, Krypton, Neon u. s. w., hat die Spektralanalyse die wichtigsten Dienste geleistet.

Zu den wunderbarsten Aufschlüssen über das Wesen der Natur selbst in den entferntesten Weltweiten aber hat diese neue Wissenschaft dadurch geführt, daß es nicht mehr nötig ist, die chemischen Stoffe in den Händen oder auch nur in zugänglicher Entfernung zu haben. Jeder aus den letzten Tiefen des Universums zu uns herüberflimmernde Lichtstrahl muß aus denjenigen Wellenlängen zusammengesetzt sein, die ihm von den Umschwungsbewegungen der molekularen Systeme jener fernen Weltkörper bei deren Ausstrahlung übertragen worden sind. Das Spektroskop gibt uns also Aufschluß über Bewegungsvorgänge jener allerfeinsten Art, die uns selbst in den irdischen Stoffen kein Mikroskop mehr direkt zu enthüllen vermag, auch wenn sie in Entfernungen vor sich gehen, die eine Sonne zu einem durchmesserlosen Lichtpünktchen zusammenschrumpfen lassen. Diese Tatsache, daß ein einfaches dreieckiges Stück Glas, von unserm forschenden Geiste richtig angewendet, uns in die molekularen Vorgänge der entferntesten Himmelskörper einen sicheren Einblick verschafft, ist wohl der wunderbarste Erfolg, den unsere vergleichende Denkkraft jemals zu verzeichnen gehabt hat. Er berechtigt uns zu Hoffnungen auf noch manchen Fortschritt unserer Erkenntnis, der uns heute noch ebenso unerreichbar erscheint, wie noch vor wenigen Dezennien die chemische Zerlegung der auf der Sonne glühenden Stoffe für möglich gehalten wurde.



G. R. Kirchhoff. Nach Werckmeister, „Das 19. Jahrhundert in Bildnissen". Vgl. Text, S. 247.

Die Betrachtung des Sonnenlichts durch ein Spektroskop gibt ein gleichmäßig verlaufendes Farbenband, durch das sich eine große Anzahl von dunkeln Linien ziehen. Die Sonne hat also einen glühenden Kern, der zunächst ein ununterbrochenes Spektrum zeigt; der Kern aber ist von einer gasförmigen Hülle, einer Atmosphäre, umgeben, die das Absorptionsspektrum hervorbringt. Diese Zusammensetzung des Sonnenspektrums hatte zuerst Fraunhofer nachgewiesen; deshalb heißen die dunkeln Absorptionslinien in diesem Spektrum auch Fraunhofersche Linien. Der Entdecker selbst bezeichnete die auffälligsten mit großen Buchstaben, so daß die erste kräftigere Linie im Rot A genannt wird; im letzten sichtbaren Violett liegt H, im ultravioletten Teile hat man die Bezeichnung bis R und noch weiter fortsetzen müssen.



beide, wie wir gesehen haben, in den von ihnen ausgehenden Ätherwellen wieder. Stimmen also diese überein, so muß dies auch für die übrigen molekularen Eigenschaften zutreffen, d. h. der Körper, welcher in der Sonne jene Wellenlängen hat, muß sich innerhalb der Beobachtungsgrenzen, die jene Übereinstimmung festzustellen erlaubte, auch physikalisch oder chemisch wie jener irdische Stoff verhalten, sich praktisch von ihm nicht unterscheiden.

Dasselbe gilt von einer großen Reihe anderer chemischen Elemente, deren Linien man im Sonnenspektrum wiederfand. Man hat auf diese Weise fast alle irdischen Stoffe auch auf der Sonne nachgewiesen, und für diejenigen, welche fehlen, hat man Gründe, anzunehmen, daß sie sich nur unserer Beobachtung entziehen. Ausführlicheres möge man hierüber in des Verfassers „Weltgebäude", S. 298 u. f., und an anderen Stellen jenes Werkes über die Ergebnisse der Himmelsspektralanalyse nachlesen, von der hier nur ein kurzer Überblick gegeben werden kann. In unserem chemischen Kapitel kommen wir auf die betreffenden Fragen zurück.

Dem Kosmologen, der Sonne, Erde und alle übrigen Körper unseres Planetensystems aus einem gemeinsamen Urnebel entstanden denkt, kam diese Tatsache des Aufbaues unseres Zentralgestirns aus den gleichen Stoffen, die unsern Erdball zusammensetzen, nicht überraschend; aber immerhin muß der wirkliche Nachweis derselben als eine großartige Errungenschaft unserer exakten Forschung gelten. Sagt uns doch das Spektroskop nicht nur, daß diese Stoffe dort vorhanden sind, sondern auch, daß sie in gasförmigem Zustande eine Atmosphäre um den Kern bilden, der wesentlich heißer sein muß als seine Hülle. Schon hieraus können wir uns einen oberflächlichen Begriff vom Temperaturgrad der Sonne machen, wenn wir erfahren, daß in jener kälteren Hülle sich Stoffe, wie Eisen und andere Metalle, in Gasform befinden, während sie von uns nur zum Teil und nur unter Anwendung der höchsten von uns erreichbaren Temperaturen, etwa im elektrischen Flammenbogen, in sehr geringen Mengen verdampft werden können. Der große Hitzegrad des Sonnenkerns und der große Druck der überliegenden Gasschichten ist fähig, das hinter den Fraunhoferschen Linien liegende kontinuierliche Spektrum zu erzeugen, auch wenn dieser Kern noch gasförmig ist. Man neigt heute in der Tat aus manchen anderen Gründen zu der Meinung, daß die Sonne noch völlig gasförmig sei.

Stellt man das Spektroskop so gegen den Rand der Sonne, daß Strahlen nicht von ihrem leuchtenden Körper, aber von ihrer gasförmigen Hülle auf den Spalt des Instrumentes gelangen können, so zeigt sich, wie wir nicht anders erwarten, nur das Emissionsspektrum aus hellen Linien. Unter diesen befindet sich bei der Wellenlänge 531,7 eine, die weder unter den Absorptionslinien des eigentlichen Sonnenspektrums vorkommt, noch einem irdischen Stoff angehört. Hier steht noch die Entdeckung eines neuen Stoffes, ähnlich wie die des Heliums, bevor. Da dieser vorläufig noch geheimnisvolle Stoff nur die höchsten Regionen der Sonnenatmosphäre einnimmt, die man als Sonnenkorona bezeichnet, so hat man dem Stoffe zunächst den Namen Koronium gegeben. Es ist jedenfalls ein spezifisch ungemein leichter Stoff, für den man noch keinen Repräsentanten auf der Erde kennt. In neuester Zeit hat man indes auch Spuren dieses Gases, wie vom Helium, in unserer Atmosphäre zu entdecken geglaubt.

Zuweilen sieht man, wenn man sich mit dem Spektroskop dem Sonnenrande nähert, daß die Wasserstofflinien plötzlich sehr wesentlich heller werden. Die Erscheinung hält oft nur wenige Minuten, zuweilen aber stundenlang an, verschwindet jedoch immer wieder. Es finden in solchen Fällen, wie sich erweisen ließ, ungeheure Eruptionen glühender Gase aus dem Sonnenkörper statt, die vor der Erfindung des Spektroskops nur in den seltenen Augenblicken einer totalen Sonnenfinsternis der Beobachtung zugänglich waren und als gewaltige rote Flammen







Teil des Thollonschen Sonnenspektrums bei der doppelten Natriumlinie.

Ursache dieser Erscheinung ist die, daß bei unserer Annäherung an die Tonquelle an das Ohr mehr Tonwellen treffen, als wenn wir uns in Ruhe befinden. Da das Licht ebenfalls eine Wellenbewegung ist, so muß durch die Bewegung der Lichtquelle eine gleiche Veränderung in der Lichttonhöhe eintreten, deren Größe wir aus derselben Formel berechnen, die wir für die Schallerscheinungen mit der Beobachtung übereinstimmend fanden. Nennen wir w_1 die Wellenlänge der ruhenden, w_2 die der bewegten Lichtquelle, s ihre Bewegung und endlich v die Geschwindigkeit des Lichtes, so muß $w_2 = w_1 + w_1 \frac{s}{v}$ sein. Die Veränderung der Wellenlänge hängt also vom Verhältnis der Geschwindigkeit der Lichtquelle zu der des Lichtes überhaupt ab. Da diese letztere sehr groß ist, nämlich gleich 300,000 km in der Sekunde, so können wir nicht erwarten, bei irdischen Geschwindigkeiten eine Veränderung der Wellenlänge spektroskopisch wahrzunehmen. Wohl aber ist dies bei den Geschwindigkeiten der Himmelskörper anzunehmen. Die Erde hat bei ihrer Bewegung um die Sonne eine Geschwindigkeit von etwa 30 km. Während sie sich also zu einer bestimmten Zeit einem feststehend gedachten Stern in jeder Sekunde um diesen Betrag nähert, entfernt sie sich ein halbes Jahr später, wenn sie sich in der anderen Hälfte ihrer Kreisbahn befindet, von dem Stern um den gleichen Betrag. Die Wellenlängen des von diesem Sterne ausgehenden Lichtes ändern sich also im Laufe eines halben Jahres im Verhältnisse von 60 zu 300,000 oder um 1 zu 5000. Für die Wellenlänge der Natriumlinie, 589 $\mu\mu$, macht dies etwa 0,1 $\mu\mu$ aus, ein Betrag, der durchaus meßbar ist. Die beiden Natriumlinien stehen um das Sechsfache dieses Wertes auseinander. Nebenstehend ist ein Teil des Sonnenspektrums in der Nähe dieser Linien nach Thollon abgebildet. Die Entfernung von der ersten Natriumlinie in diesem Spektrum bei 1,08 zu der ihr rechts zunächst stehenden feinen Doppellinie bei 2,2 des beigegebenen Maßstabes entspricht dem Betrage der oben erörterten Verschiebung.

Welche sichtbaren Erscheinungen entstehen nun im Spektrum durch die Veränderung der Wellenlängen? Da jede Wellenlänge einen bestimmten

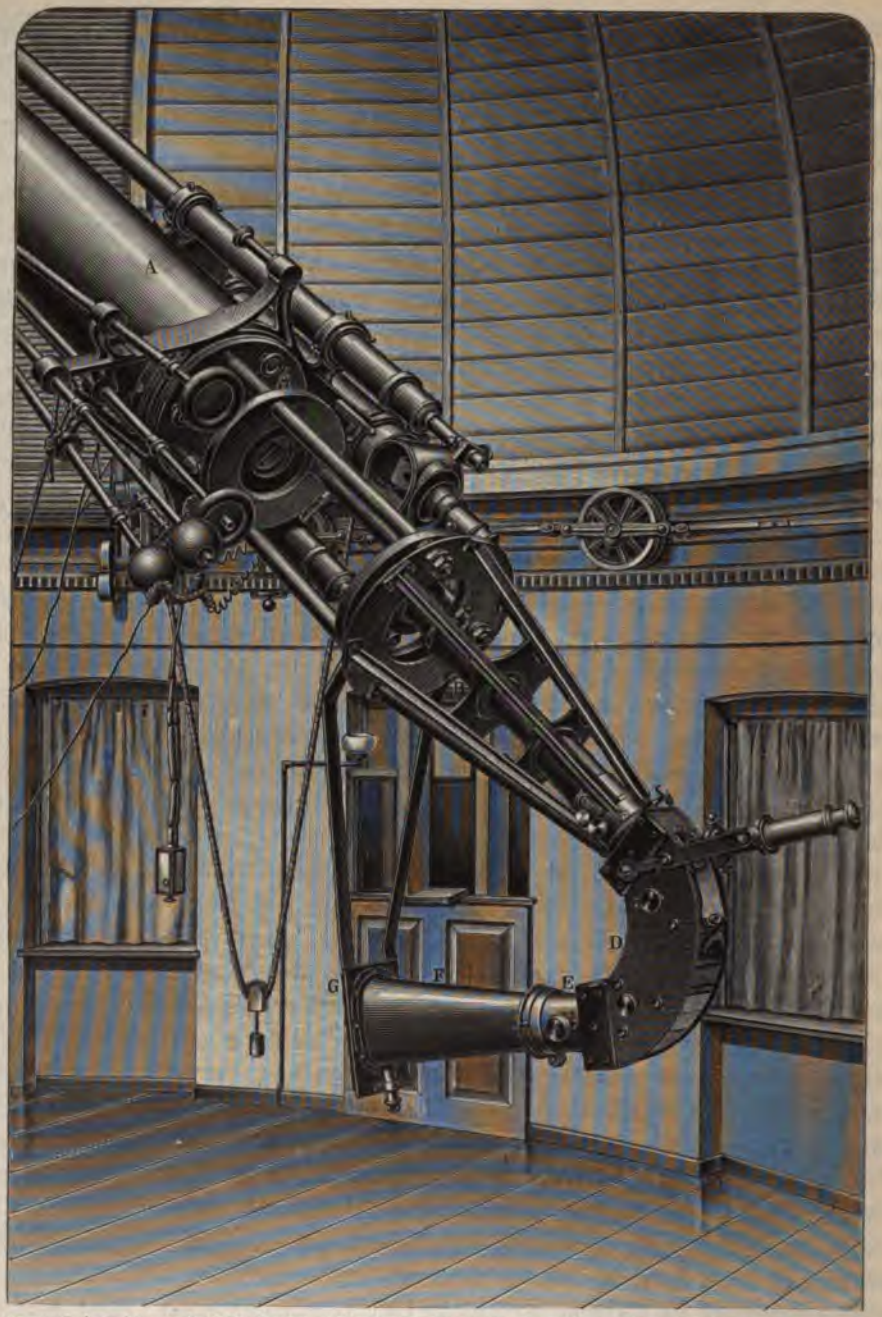
Farbeneindruck in unserem Auge hervorruft, so bedeutet dies, daß eine Erhöhung der Schwingungszahl durch Bewegung der Lichtquelle eine gelbe Linie grüner, eine grüne blauer werden läßt. Gleichzeitig verändert sich aber auch das hinter den Linien etwa befindliche kontinuierliche Spektrum. Vorher unsichtbare Wärmestrahlen rücken in den sichtbaren Teil des Spektrums, während die unter gewöhnlichen Verhältnissen noch sichtbaren Strahlen am violetten Ende zu unsichtbaren ultravioletten Strahlen werden. Das gesamte Spektrum wird also durch die Annäherung nach der violetten Seite hin verschoben, bei Entfernung dagegen nach der roten Seite. Wir nehmen deshalb ohne weiteres keine Veränderung an dem Spektrum wahr. Entwerfen wir aber über dem so verschobenen Spektrum das einer ruhenden Lichtquelle, z. B. einer Natriumflamme, so können die von ihr erzeugten Linien nicht mehr in der Verlängerung der anderen liegen, sondern müssen der Bewegung der Lichtquelle entsprechend verschoben sein, um einen Betrag, der durch die angegebene Formel zu berechnen ist und die Bewegung der Lichtquelle in Kilometern pro Sekunde angibt. Da man hierzu die Verschiebung nur in Teilen der Wellenlänge selbst zu wissen braucht, so kann die Messung mit Umgehung jeder anderen Maßeinheit in Teilen des Abstandes zweier Linien voneinander geschehen, deren Wellenlängen man kennt, z. B. der beiden Natriumlinien. In manchen Fällen gestattet noch genauere Messungen das von Zöllner erfundene sogenannte Reversionsspektroskop, das zwei Spektren des Objektes übereinander entwirft, jedoch so, daß das eine sein violettes Ende dort hat, wo sich bei dem anderen das rote befindet. Dadurch wird für die beiden übereinanderliegenden Liniensysteme die Verschiebung verdoppelt.

Man begreift ohne weiteres, wie ungemein wichtig für die Himmelsforschung dieses sogenannte Doppler-Fizeausche Prinzip der Linienverschiebungen werden mußte. Gestattet es doch, Bewegungen von Weltkörpern in der Richtung genau auf uns zu oder von uns weg, d. h. in der Gesichtslinie, durch Messung zu ermitteln, Bewegungen, die sich jeder anderen Beobachtungsart selbst mit unseren weltdurchdringendsten Fernrohren völlig entziehen. Dazu gibt diese spektroskopische Methode für die Bewegungen, mögen sie auch in durchaus unbekannten Entfernungen von uns geschehen, irdische Maße, Kilometer in der Sekunde, an, während die teleskopische Messung der anderen, zur Gesichtslinie senkrechten Bewegungskomponente nur Werte angeben kann, die sich erst bei bekannter Entfernung des Objektes in solche irdischen Maße übersetzen und also nur dann mit anderen Bewegungen direkt vergleichen lassen.

Daß die instrumentellen Mittel für die Anwendung des neuen Prinzips von Bewegungsmessungen in vollkommenster Weise ausgearbeitet worden sind, und daß auch namentlich die den ultravioletten Teil des Spektrums mit abbildende Photographie dabei wesentliche Dienste leistet, wird man sich denken können. Auf S. 254 ist ein im astrophysikalischen Observatorium zu Potsdam zu diesen Zwecken verwendeter sogenannter Spektrograph abgebildet, der an den großen Refraktor A montiert ist.

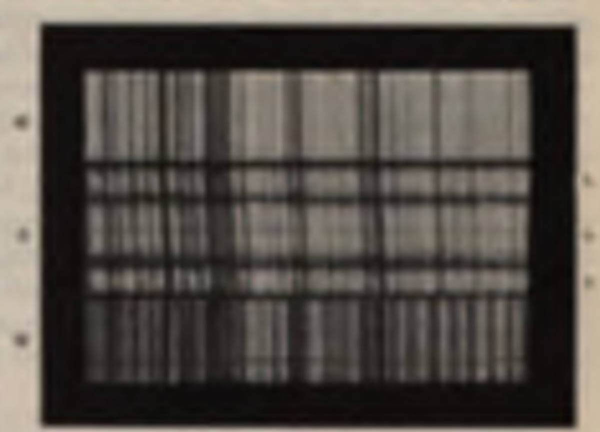
Von den Forschungsresultaten dieser Methode können wir hier nur flüchtig folgende erwähnen.

Man fand, daß die Fixsterne beträchtliche Eigenbewegungen haben, deren Winkelgröße man ja auch bereits vielfach gemessen hatte. So kommt uns Sirius in jeder Sekunde 75 km näher, Wega dagegen eilt 80 km weiter von uns hinweg. Bei einigen Sternen hatte man die merkwürdige Wahrnehmung gemacht, daß ihre Spektrallinien sich periodisch verdoppelten und wieder einfach erschienen. Dies konnte nur so erklärt werden, daß hier zwei Sterne so nahe beieinander stehen, daß man sie im Fernrohre nicht mehr einzeln zu erkennen vermag, und daß



Spektrograph des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam. Der aus dem Refraktor A durch ein Objektiv in das Kollimatorrohr BC einfallende Lichtstrahl geht bei C durch einen Spalt in das Gehäuse D, wird von den darin befindlichen Prismen weiter nach einer photographischen Camera EF geleitet und in der Kassette G auf einer Platte fixiert. Vgl. Text, S. 253.

diese beiden Sterne umeinander kreisen, wie man es bei vielen anderen Sternpaaren ja auch direkt sehen kann. Zu gewissen Zeiten wird dann der eine Stern auf uns zu, der andere



sie ebenso verschwommen erscheinen wie durch den Fehler der sphärischen Abweichung, der ja gleichfalls in einer bestimmten Entfernung von der Linse verschieden große Bilder gibt, je nachdem sie von Zentral- oder von Randstrahlen herrühren. Zu den Fehlern der Linse kommt demnach noch die chromatische Abweichung. Es braucht wohl hier kaum angedeutet zu werden, daß Spiegel diesen Fehler nicht haben können, da bei der einfachen Reflexion keine Farbenzerstreuung stattfindet. Spiegelteleskope sind also immer achromatisch.

Anders ist es mit den Refraktoren, den Mikroskopen und allen anderen optischen Instrumenten, die ihre Bilder durch brechende Linsen entwerfen. Es war deshalb lange eines der wichtigsten Probleme der praktischen Optik, achromatische Sehwerkzeuge dieser Art zu konstruieren. Durch einen irrtümlichen Schluß hatte der sonst so scharfsinnige Newton seinerzeit nachweisen zu können geglaubt, daß dieses Problem überhaupt unlösbar sei. Deshalb behalf man sich lange Zeit mit sehr langen Brennweiten, die die chromatische Abweichung für das Bild möglichst unschädlich machen, ähnlich wie sie die sphärische Abweichung beseitigen (s. S. 214). Erst etwa fünfzig Jahre nach Newtons Irrtum erfand Dollond das achromatische Fernrohr, und damit begann eine ganz neue Ära für die Erforschung sowohl des Himmels wie der mikroskopischen Welt.

Die Lösung der Aufgabe wurde dadurch möglich, daß man bei verschiedenen durchsichtigen Stoffen ein verschiedenes Brechungsvermögen wahrnahm, wie wir bereits auf Seite 217 erfahren haben. Nicht nur das mittlere Brechungsvermögen, das etwa für die in dem mittleren grünen Teile des Spektrums liegende E-Linie gilt, sondern auch die Größe der gesamten Ausbreitung des Spektrums, die sogenannte totale Dispersion, ist für die einzelnen Stoffe verschieden. Die entsprechenden Zahlenwerte für einige hier in Betracht kommende Substanzen sind folgende:

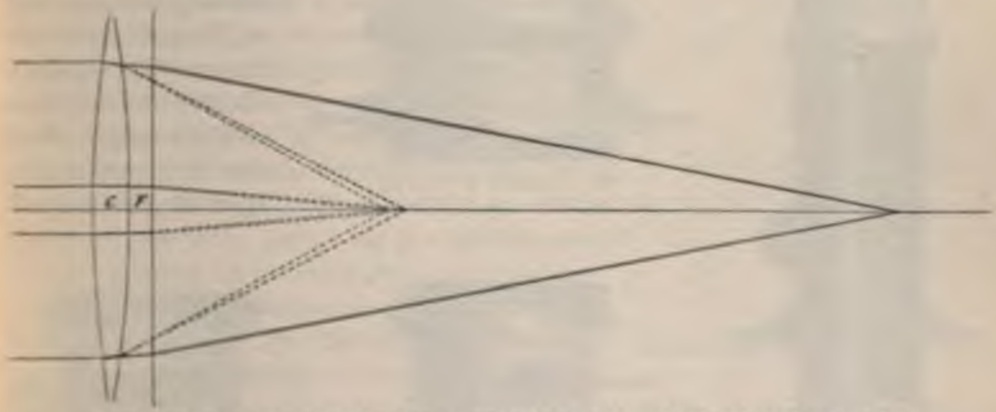
	n	$n_r - n_v$		n	$n_r - n_v$
Wasser	1,335	0,015	Kronglas, schwer	1,618	0,021
Alkohol	1,366	0,015	Flintglas, leicht	1,615	0,042
Schwefelkohlenstoff	1,644	0,091	" schwer	1,762	0,076
Kronglas, leicht	1,519	0,021	Steinsalz	1,550	0,031

In dieser Tabelle bedeutet n das Brechungsverhältnis für die E-Linie und $n_r - n_v$ den Brechungsunterschied zwischen dem roten und violetten Ende des Spektrums, also die totale Dispersion. Wir sehen aus den Zahlen, daß z. B. Schwefelkohlenstoff ein sechsmal längeres Spektrum entwirft als Wasser, wenn man mit diesen Substanzen ein prismatisch geformtes Gefäß füllt, und daß die vier verschiedenen hier angeführten Glassorten sowohl in ihren mittleren Brechungsverhältnissen als auch in ihrer totalen Dispersion sehr verschiedene Eigenschaften haben. Durch diese allein gelingt es, den Fehler der Farbenabweichung zu beseitigen.

Machen wir uns die Sache zunächst an der einfacheren Wirkung der Prismen klar. Es ist selbstverständlich, daß man die Farbenzerstreuung des einen Prismas durch ein anderes immer wieder aufheben kann. Man braucht nur ein ganz genau gleiches Prisma wie das zerstreuende zu nehmen und es umgekehrt an das erste zu legen, also bei dem einen die Kante nach oben, bei dem anderen nach unten. Bei solcher Kombination ganz gleichwinkeliger Prismen müssen dann auch die Ein- und Austrittsflächen des Strahles einander parallel sein, die Prismen bilden zusammen eine planparallele Platte, bei welcher, wie wir schon auf Seite 221 gesehen haben, der ausfallende Strahl mit dem einfallenden parallel ist. Es kann deshalb auch keine Farbenzerstreuung stattfinden. Solche Kombination nützt uns aber für den Bau von Linsen für optische Zwecke nichts, weil parallele Strahlen kein Bild erzeugen können; wir brauchen dazu ein konvergentes Strahlenbündel, gebrochene Strahlen. Diese erhalten wir bei

einer Prismenkombination nur durch ungleichwinkelige Prismen (s. die Figur 3 auf unserer Tafel, S. 235). Wenn z. B. das zweite Prisma nur einen halb so großen Prismenwinkel wie das erste hat, aber aus einer Substanz besteht, die noch einmal so stark die Farben zerstreut wie die des ersten, so ist seine Wirkung der des ersten gleich, aber wegen seiner Lage umgekehrt: es hebt die Farbenzerstreuung auf, während die wieder austretenden Strahlen wegen der nicht parallelen Seitenflächen der Kombination gegen ihre Eintrittsrichtung gebrochen sind. Unsere Zahlenzusammenstellung auf S. 256 zeigt, daß schweres Kronglas und leichtes Flintglas diese Bedingung erfüllen.

Auch die umgekehrte Aufgabe kann man verfolgen und eine Prismenkombination herstellen, durch die die austretenden zerstreuten Strahlen mit dem einfallenden Strahl wieder durchschnittlich parallel sind, während die Farbenzerstreuung bestehen bleibt; man erhält dann ein sogenanntes Spektroskop mit gerader Durchsicht, das manche praktische Vorteile hat (s. die Figur 4 auf der Tafel, S. 235).



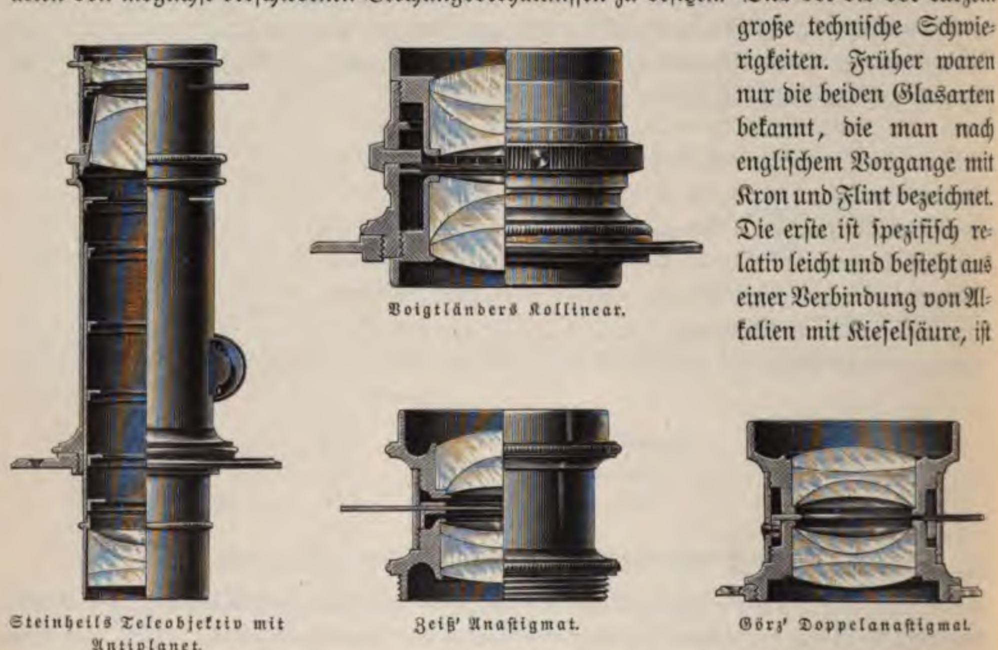
Vereinigung der Strahlen in einem Punkte durch achromatische Linsenkombination.

Ebenso wie durch die Konstruktion achromatischer Prismen wird durch die Vereinigung von zwei Linsen aus solchen verschiedenen Glassorten ihre Farbenzerstreuung aufgehoben; denn wir haben gesehen (S. 225), daß man die Wirkung der Linsen aus der von unendlich kleinen Prismen herleitet. Auf unserer Tafel, S. 235, haben wir in der Figur 5 eine bikonvexe Linse mit ihrem Strahlengange dargestellt und sehen, wie die blauen Strahlen sich viel näher an der Linse vereinigen als die roten. Figur 6 zeigt dagegen eine plankonkave Linse aus einer anders brechenden Glasart, welche umgekehrt die roten Strahlen der Linse näher vereinigt als die blauen. Verbindet man, wie obenstehende Abbildung zeigt, zwei solcher Linsen C (Kronglas) und F (Flintglas) miteinander zu einem achromatischen Linsensystem, so kann man nahezu eine Vereinigung aller Strahlen in einem Punkt erreichen.

Die Aufgaben der praktischen Optik sind sehr vielseitige. Man will keineswegs immer alle Farben vereinigen, also ein weißes Bild von einem weißen Objekte wieder hervorbringen. Wir haben gesehen, daß der photographisch wirksamste Teil des Spektrums die blaue Seite desselben ist. Ein photographisches Objektiv soll deshalb diese sogenannten aktinischen Strahlengattungen hauptsächlich vereinigen. Durch solche Anforderungen, insbesondere aber weil diejenigen Verbindungen von Linsenflächen, welche die Farbenabweichung beseitigen, bei den gebräuchlichen, leichter herzustellenden Glassorten den Fehler der sphärischen Abweichung wieder

vergrößern, wird die Aufgabe, die besten Verbindungen von Linsenflächen herauszufinden, eine sehr verwickelte und nur der mathematischen Analyse zugänglich. Die modernen Objektive begnügen sich schon nicht mehr mit jenen drei Linsen, sondern man fügt noch ein gleiches oder ein anderes System hinzu. Die Doppelanastigmate von Görz, die Kollineare von Voigtländer, die Zeißschen Anastigmate und Steinheils Teleobjektiv (s. die untenstehenden Abbildungen) sind derartige Kombinationen, die für die Photographie von großer Bedeutung geworden sind. Man hat es also hier mit zwölf und mehr brechenden Flächen zu tun, deren Wirkungen man studieren muß. Der gleichen Sorgfalt bedürfen bei den astronomischen Fernrohren natürlich auch die Okulare.

Um allen diesen verschiedenen Anforderungen gerecht zu werden, war es erwünscht, Glasarten von möglichst verschiedenen Brechungsverhältnissen zu besitzen. Dies bot bis vor kurzem große technische Schwierigkeiten. Früher waren nur die beiden Glasarten bekannt, die man nach englischem Vorgange mit Kron und Flint bezeichnet. Die erste ist spezifisch relativ leicht und besteht aus einer Verbindung von Alkalien mit Kieselsäure, ist ein Alkaliglas, Flintglas dagegen enthält Bleisalze und ist deshalb schwer. Das spezifische Gewicht steht aber mit dem Brechungsvermögen in nahem Zusammenhange, wie wir schon auf Seite 223 erfahren haben. Nachdem seit einigen Jahren in dem mit Unterstützung des preußischen Staates errichteten Glastechnischen Institut von Schott und Genossen in Jena systematisch alle möglichen Glasflüsse hergestellt und auf ihre optischen Eigenschaften genau geprüft worden sind, hat man eine erstaunlich reichhaltige Liste von optischen Gläsern mit den verschiedensten Brechungsverhältnissen und Dispersionen den praktischen Optikern zur Verfügung gestellt und dadurch den mannigfachen Forschungszweigen die wertvollsten Dienste geleistet.



Voigtländers Kollinear.

Steinheils Teleobjektiv mit Antiplanet.

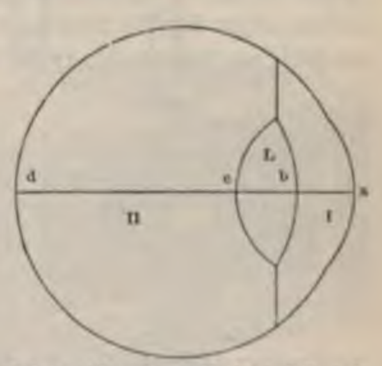
Zeiß' Anastigmat.

Görz' Doppelanastigmat.

i) Das menschliche Auge.

Wir haben bisher die Gesetze kennen gelernt, nach welchen die Farbenzerstreuung der Linsen aufgehoben wird, und können nun die Eigenschaften des menschlichen Auges als optisches Instrument näher betrachten. Die optischen Wirkungen des Auges sind, wie wir wissen, im

großen und ganzen mit denen einer photographischen Camera zu vergleichen. Die lichtempfindliche Netzhaut entspricht der photographischen Platte, und das von ihr empfundene Bild wird durch eine Linse erzeugt, deren Farbenfehler durch verschieden brechende, sie umgebende Substanzen aufgehoben wird. Aber im besonderen ist doch der Bau des Auges wesentlich verschieden von dem irgend eines unserer optischen Instrumente. Dieser Unterschied ist namentlich in dem Umstande begründet, daß die Natur mit flüssigen oder biegsamen Substanzen arbeiten kann und muß, um die Einrichtungen des tierischen Organismus möglichst gegen Beschädigungen durch Druck und Stoß zu schützen und doch zugleich den notwendigen Stoffwechsel aufrecht zu erhalten. Die Linse des Auges, in unserer untenstehenden schematischen Abbildung L, ist deshalb kein harter Körper mit unveränderlich gekrümmten Flächen, sondern besteht aus einer elastischen durchsichtigen Masse, deren Grenzflächen verschiedene Krümmungen annehmen können. Diese Kristalllinse befindet sich zwischen zwei voneinander getrennten Augenkammern I und II, die verschieden brechende Flüssigkeiten enthalten.



Schematischer Durchschnitt des Auges.

Die vordere Augenkammer ist nach außen hin von der Hornhaut begrenzt, die, wie der Name besagt, aus einer ziemlich widerstandsfähigen Hornsubstanz besteht und das Auge wie ein Uhrglas vor dem Eindringen von Fremdkörpern schützt. Zwischen ihr und der ersten Fläche der Kristalllinse befindet sich eine wasserhelle Flüssigkeit, deren Brechungsverhältnis an der Grenze zwischen ihr und der Hornhaut, also bei a, gleich 1,346 ist. Die Entfernung von der Hornhaut bis zur ersten Fläche der Kristalllinse, a—b, beträgt, auf der Augenachse gemessen, bei der Einstellung des Auges auf einen sehr entfernten Gegenstand unter normalen Verhältnissen 3,78 mm. Dicht vor der ersten Linsenfläche ist die Regenbogenhaut eingeschoben, welche die Aufgabe der Irisblende bei unseren photographischen Apparaten hat. Sie verändert die optische Öffnung des Auges, um den veränderlichen Lichtmengen, die auf dasselbe eindringen, Rechnung zu tragen. Diese Pupille kann sich von 2 mm auf 5 mm ausdehnen. Das Brechungsverhältnis an der Grenzfläche zwischen der vorderen Augenkammer und der Linse bei b ist gleich 1,080. Hinter der Linse, in der eigentlichen Augenhöhle II, liegt der Glaskörper, der wie die Linse durchsichtig und elastisch ist. Zwischen beiden, bei c, ist das Brechungsverhältnis 0,926. Der Durchmesser der Linse in ihrer optischen Achse, also ihre Dicke, beträgt 4 mm, der Weg von der inneren Linsenfläche bis zur Netzhaut, c—d, 14,43 mm, und der ganze Augapfel von der Hornhaut bis zur Netzhaut hat eine Tiefe von 22,21 mm. Das Auge hat demnach drei brechende Flächen, die der Hornhaut und die beiden Linsenflächen, deren Kugelradien folgende Maße haben: Hornhaut 7,8 mm, erste Linsenfläche 9,51 mm, zweite Linsenfläche 5,87 mm. Die Linse ist somit nach innen viel stärker gekrümmt als nach der Hornhaut zu; dafür ist, entsprechend unseren Erörterungen über die Beseitigung der Farbenzerstreuung auf S. 256, das Brechungsverhältnis an der inneren Fläche ein geringeres.

Wir sehen, daß ein wesentlicher Unterschied zwischen dem optischen System des Auges und den diesem feinsten Organe nachgebildeten Instrumenten in der Ungleichartigkeit der brechenden Mittel vor und hinter den bilderzeugenden Flächen liegt. Vor und hinter jedem Objektiv ist die Luft; beim Auge durchläuft der aus der Luft eintretende Strahl nacheinander drei

verschieden brechende Substanzen, ohne wieder in die Luft zurückzukehren, bis er zur Bildfläche auf der Netzhaut gelangt. Dadurch werden die optischen Gesetze für die Bildung des Brennpunktes im Auge andere, als wir sie für unsere Objektive gefunden haben. Sie lassen sich ebenso wie jene aus den allgemeinen Brechungsgesetzen durch rein geometrische Betrachtungen ableiten, denen wir hier ebensowenig folgen können wie bei der Bildkonstruktion der einfachen Linsen. Es ergibt sich das Folgende:

In der untenstehenden schematischen Zeichnung sind die vier verschiedenen optischen Räume durch gerade Linien abgeteilt. A ist der lufterfüllte Raum vor dem Auge, W der Raum des Augenwassers hinter der Hornhaut, L der des Linsenkörpers und U der des Glaskörpers in der Augenhöhle. O, O_1 und O_2 sind die Durchschnittspunkte der Augenachse mit den betreffenden brechenden Flächen; f_1 und f_2 sind die beiden Brennpunkte des optischen Systems. Es ergibt sich dann, daß zwei zur Achse senkrechte Ebenen, deren Lage wir bei h_1 und h_2 gezeichnet haben, die sogenannten **Hauptebenen**, geometrische Eigenschaften haben, die unsere Anschauungen über die Wirkungen des Auges vereinfachen. Die erste dieser Ebenen liegt auf der Achse um 1,93 mm von O ab; beide Ebenen sind nur durch den kleinen Raum von 0,40 mm



Schema des Auges.

voneinander getrennt. Der Strahlengang im Auge verhält sich nun, als ob gewissermaßen dieser Raum zwischen den beiden Hauptebenen ganz entfernt wäre; die Strahlen scheinen diesen Raum zu überspringen. Nehmen wir zwei Punkte i_1 und i_2 auf diesen Ebenen, so wird ein gegen i_1 gerichteter, zur Achse paralleler Strahl erst von i_2 aus so gebrochen, daß er im Brennpunkte f_2 die Achse schneidet. Dagegen wird ein vom ersten Brennpunkte f_1 auf i_1 zielender Strahl von i_2 aus den Achsen parallel. Geben wir noch an, daß die Entfernung des ersten Brennpunktes von h_1 gleich 14,77 mm, die des zweiten f_2 von h_2 gleich 19,88 mm ist, so hat man alles, was zur genauen Konstruktion des Netzhautbildes nötig ist. Eine auf den angeführten Maßen beruhende Berechnung ergibt, daß z. B. das Bild eines Gegenstandes von 1 m Ausdehnung, aus einer Entfernung von 10 m gesehen, auf unserer Netzhaut eine Größe von etwa 1,5 mm haben wird.

Alle hier gegebenen Verhältnisse gelten nur für ein auf ein fernes Objekt eingestelltes Auge. Wären sie unveränderlich, so müßte man alle nahen Gegenstände unscharf sehen, wie in einer photographischen Camera, die keine Einstellvorrichtung hat. Dieses Scharfstellen auf verschiedene Entfernungen geschieht nun, wegen der eigentümlichen Teilung des Auges in zwei voneinander abgeschlossene Kammern, in ganz anderer Weise als bei unseren optischen Instrumenten. Es ist für das Auge nicht möglich, die Entfernung des optischen Systems von der Bildfläche, d. h. der Linse von der Netzhaut, jedesmal zu verändern. Demnach muß, um die Brennpunkte verschieben zu können, die Krümmung der brechenden Flächen veränderlich gemacht werden, was bei dem elastischen Zustande der Kristalllinse leicht ist. Gegen den Rand der Linse drückt ein Muskel, der Akkommodationsmuskel, und gibt ihr dadurch die

für nähere Objekte nötige größere Krümmung, während die Brennweite unverändert bleibt. Hört der Druck dieses Muskels auf, so nimmt die Linse von selbst wieder ihre normale Form an. Daher kommt es, daß das Betrachten naher Gegenstände eines gewissen Kraftaufwandes bedarf, der für das Sehen in die Ferne nicht gebraucht wird, und daß bei Leuten, deren Tätigkeit ein andauerndes Scharfstellen des Auges auf nahe Gegenstände erfordert, die Linse schließlich einen Teil ihrer Elastizität verliert und dadurch eine zu große Krümmung beibehält: die Augen werden kurzsichtig.

Durch Brillen kann man bekanntlich solche und andere Einstellungsfehler des Auges beseitigen. Kurzsichtige gebrauchen Konkavgläser, weil diese den Brennpunkt entfernen; Weitsichtige, für welche der Brennpunkt der Kristalllinse hinter der Netzhaut liegt, müssen Konvergläser tragen, um den Brennpunkt näher zu legen. Beide Augenfehler können natürlich auch durch ein falsches Verhältnis der Tiefe der Augenhöhle, also des Abstandes der Linse von der Netzhaut, entstehen, während die Linse selbst normal gekrümmt ist.



Panorama-Apparat. a Drehbares Objektiv; b Einstellvisier; d Halbkreisförmige Aufnahmefläche.

Da die soeben geschilderten Vorrichtungen zur Akkommodation des Auges nur innerhalb gewisser Grenzen arbeiten, so bleiben Gegenstände, die dem Auge über eine bestimmte Entfernung, die Sehweite, nahe gebracht werden, verschwommen. Die normale Sehweite beträgt 25 cm, ist aber bei Kurzsichtigen geringer, bei Weitsichtigen größer. Die entsprechenden Schwankungen bewegen sich zwischen 18 und 36 cm.

Das Gesichtsfeld des Auges ist so ungemein groß, daß es von keinem unserer optischen Werkzeuge auch nur annähernd erreicht wird. Beide Augen zusammen umfassen mehr als 180° Sehwinkel, beherrschen also das ganze vor uns liegende und sogar zum Teil das hinter uns liegende Gebiet. Das konnte einerseits nur dadurch erreicht werden, daß die Bildfläche der Netzhaut einen Halbkreis bildet, nicht wie bei unseren photographischen Apparaten eine ebene Fläche ist, anderseits geschah es durch Verzichtleistung auf eine wesentliche Korrektion der sphärischen Abweichung. Durch die erste Vorrichtung wird erreicht, daß die Entfernung der Linse von der Bildfläche auch für Randstrahlen dieselbe bleibt wie für Zentralstrahlen, wodurch dem Fehler der sphärischen Abweichung einigermaßen entgegengewirkt wird. Bei einem so großen Gesichtswinkel ist überhaupt diese gewölbte Aufnahmefläche des Bildes eine praktische Notwendigkeit und wird darum auch bei den sogenannten Panorama-Apparaten angewendet (s. die obenstehende Abbildung), die gleichfalls ein Bild mit einem Gesichtswinkel von 180° aufnehmen können, freilich nur, wenn man dem Objektiv während der Aufnahme eine entsprechende Drehung gibt.

Wegen der veränderlichen Form der Kristalllinse ist es nicht möglich, ihre Rand- und Mittelstrahlen in eine feste Beziehung zueinander zu bringen, um die sphärische Abweichung dadurch zu beseitigen. Das Auge hat sogar in hohem Maße diesen Fehler; es sieht nur scharf im Gebiete der Mittelstrahlen, wo die Krümmung der brechenden Flächen auf dem entsprechenden kleinen Kugelausschnitt noch als korrekt angesehen werden kann; alles, was außerhalb

dieses sehr kleinen Mittelgebietes liegt, wird nur verschwommen wahrgenommen, wie durch eine sehr schlechte Glaslinse. Wir haben bereits in unseren einleitenden Betrachtungen über die Rolle der Sinneswerkzeuge für die Forschung (s. S. 39) zu erklären versucht, wie gerade die Unvollkommenheit die Zuverlässigkeit unserer Sinneseindrücke durch diese wichtigste aller Eingangspforten unseres Bewußtwerdens der Außenwelt wesentlich fördert. Nur hierdurch werden wir beständig veranlaßt, genauere Prüfungen und Vergleiche mit Hilfe der allein zuverlässigen Koinzidenzbeobachtungen immer an einer und derselben Stelle der Netzhaut mit denselben Nervenendigungen vorzunehmen, so daß Fehler, welche durch die verschiedene Wirkungsweise ähnlicher, aber nicht völlig gleicher Vorrichtungen entstehen, ausgeschlossen sind.

Die früheren Betrachtungen lehrten, daß im Gebiete dieser ohnehin scharfen Mittelstrahlen der sogenannte gelbe Fleck liegt, der mit besonders feinen Nervenfasern ausgestattet ist, um das Sehvermögen an dieser Stelle noch weiter zu verstärken. Dieser gelbe Fleck hat kaum ½ mm Ausdehnung. Aber auch innerhalb dieses engen Raumes nimmt die Empfindlichkeit noch weiter nach der Mitte hin zu, so daß man für ganz genaue Vergleiche nur die hier endigenden Nerven wählt. Schon das Bild eines Gegenstandes von nur 7,5 mm Ausdehnung, in deutlicher Sehweite vom Auge gehalten, nimmt die ganze Fläche des gelben Fleckes ein. Die hier endigenden Sehzapfen haben eine Dicke von 0,0015—0,0025 mm. Das entspricht, wie wir aus den vorhin gegebenen optischen Dimensionen des Auges leicht berechnen können, einem Gesichtswinkel von etwa 30 Bogensekunden. Zwei oder mehr Strahlen, welche innerhalb dieses Winkels von einem Gegenstand in unser Auge dringen, treffen deshalb dort auf ein und denselben Sehzapfen und können nur den Eindruck eines einzigen Reizes hervorbringen. Solche Gegenstände erscheinen durchmesserlos, als Punkte. Dementsprechend hat man bestätigt gefunden, daß zwei Gegenstände, etwa zwei Linien, mindestens 50 Bogensekunden auseinanderstehen müssen, um getrennt wahrgenommen zu werden. Dies ist also die Grenze des Trennungsvermögens unseres Auges. Ein Gegenstand von etwa 0,06 mm erscheint, aus normaler Sehweite betrachtet, unter diesem Winkel.

Unter kleinerem Gesichtswinkel betrachtete Gegenstände verschwinden, wie aus dem Vorangegangenen hervorgeht, an sich durchaus nicht wegen dieser Kleinheit, denn wir erkennen z. B. einen im Sonnenschein durch seinen noch frischen Metallglanz leuchtenden Telegraphendraht noch unter einem Winkel von 5 Sekunden ganz deutlich. Alle Fixsterne sind in unseren kräftigsten Fernrohren durchmesserlos, ihr Gesichtswinkel ist also nicht nur für das bloße Auge verschwindend klein. Dennoch strahlen sie zum Teil in eindruckvollstem Lichte. Solange es nicht darauf ankommt, die Einzelheiten eines Objektes zu unterscheiden, hängt die Frage seiner Sichtbarkeit überhaupt nur von seiner Lichtstärke ab. Schon früher haben wir gesehen, wie man diese Lichtstärke durch Anwendung von möglichst großen Objektiven in unserem Auge vergrößern kann. Will man aber Einzelheiten des Objektes wahrnehmen, deren Winkelausdehnung für die Sehweite des betreffenden Auges unter jenem Winkel von etwa einer Minute liegt, so muß durch optische Mittel dieser Winkel vergrößert werden. Das kann auf zweierlei Weise geschehen: durch die Lupe und das Mikroskop. Die Lupe verkürzt die Sehweite, so daß man das Objekt mit ihrer Hilfe dem Auge näher bringen kann, ohne die Lage des zweiten Brennpunktes, d. h. die Bildschärfe auf der Netzhaut, zu verändern. Durch das Näherrücken des Objektes entspricht demselben Grenzwinkel für das Trennungsvermögen überhaupt eine kleinere Ausdehnung des Gegenstandes. Wir sehen hieraus auch, weshalb Kurzsichtige für das scharfe Sehen in der Nähe (ohne Brille) einen Vorteil gegen normale Augen haben. Der Vergrößerung

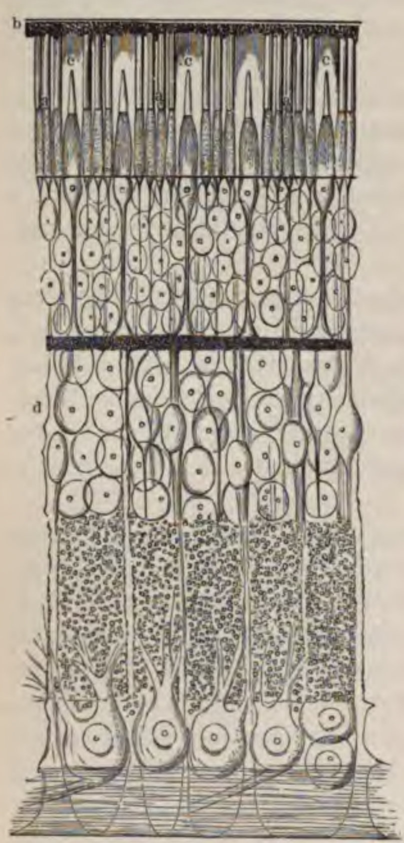
durch die Lupe aber ist eine Grenze gesetzt, weil die Annäherung des Gegenstandes doch nur bis zur äußeren Linsenfläche der Lupe erreichbar ist. Für die optische Kombination des Mikroskopes ist dies nicht der Fall, denn bei diesem wird die Vergrößerung des Gesichtswinkels durch Ausbreitung des Strahlenkegels in der früher angegebenen Weise (S. 232) bewirkt. Selbstverständlich müssen die Objektive der Mikroskope auch achromatisch sein. Es ist eine höchst bewunderswerte Kunst, solche Linsensysteme herzustellen, die oft noch kleiner als der Linsenkörper unseres Auges sind. Der Wert des dazu verwendeten Stückchens Glas wird durch menschlichen Scharfsinn und menschliche Handfertigkeit zuweilen größer als der des kostbarsten Edelsteines von gleicher Größe.

Ist es hier auch nicht unsere Aufgabe, zu ergründen, wie das auf der Netzhaut in der vorhin geschilderten Weise entstandene Bild nun bewußt empfunden wird (wir haben darüber einiges in unseren einleitenden Betrachtungen, S. 42, gesagt), so haben wir uns doch an dieser Stelle zu fragen, wie die auf der Netzhaut ankommenden Lichtwellen im stande sind, Nervenreize auszuüben, die sich nach Lichtstärke und nach den unendlich vielen Farbentönen voneinander unterscheiden.

Bisher hat uns der photographische Prozeß vielfache Vergleiche mit der Wirkung des Auges gestattet, er schien aber bis vor kurzem in bezug auf das farbige Sehen zu versagen, da die gewöhnlichen Photogramme ja nur schwarz-weiße Wiedergaben des optischen Bildes in der Camera sind, also trotz des auf der Mattscheibe vorhandenen farbigen Bildes nur Unterschiede der Lichtstärke wiedergeben. Seit aber in jüngster Zeit erfolgreiche Versuche mit der Photographie in natürlichen Farben gemacht werden, nähern wir uns auch in dieser Hinsicht den wirklichen Vorgängen.

Wir müssen auch bei der Entstehung der Nervenreize aus der Wirkung der Lichtwellen den Unterschied zwischen der Lichtstärke und dem Farbenreiz machen. Das entspricht für die Schallwellen der Stärke des Tones und seiner Höhe. In beiden Fällen wird die Lichtstärke durch die Ausschlagsgröße (Amplitude) der Wellen, die Höhe des Tones bedingt, dagegen die Art der Farbe durch die Anzahl der Schwingungen. Wir begreifen, daß für diese beiden ganz verschiedenen Arten von Bewegungen auch verschiedene Einrichtungen vorhanden sein müssen, die sie in Nervenreize umsetzen. Für die Schallwellen wurde dies bekanntlich dadurch erreicht, daß für jeden Ton oder doch für eine gewisse, noch unbekannte Anzahl von Tonstufen je eine Nervenendigung im Cortischen Organ des Ohres vorhanden ist, eine Lamelle, die beim Eindringen des Tones in Mitschwingungen gerät. Durch diesen Vorgang wird unmittelbar die Höhe des Tones, durch den Schwingungsgrad jener Lamelle aber die Tonstärke in den entsprechenden Nervenreiz umgesetzt. Trotz der physikalischen Ähnlichkeit der Lichtwellen mit denen des Schalles war indes aus leicht ersichtlichen Gründen eine ähnliche Einrichtung für die Zwecke des Sehens nicht verwendbar. Das Hören ist gewissermaßen eine lineare, das Sehen eine Flächenfunktion. Wir hören zu gleicher Zeit immer nur einen Ton, beziehungsweise einen einheitlich wirkenden Akkord. Kommen mehrere nicht einheitlich zusammenklingende Töne zusammen, so werden sie zu einem Geräusch, in welchem die einzelnen Töne nicht mehr erkennbar sind. Das Auge aber soll auf einer Fläche zugleich ein ganzes, aus einer für uns unendlich großen Anzahl von Punkten bestehendes Bild auffassen. Jedes Element der Netzhaut müßte demnach aus einem vollständigen Cortischen Organe für Lichtwellen mit scheinbar unzählig vielen Lamellen für jede Farbenart bestehen. Für unsere sinnliche Wahrnehmung unendlich viele und feine Organe würden das Auge zusammensetzen. Dies war wohl von vornherein nicht zu erwarten. Die

mikroskopische Untersuchung hat nun gezeigt, daß die Elemente der Netzhaut aus sehr feinen **Stäbchen** und **Zapfen** bestehen, die wie in untenstehender Zeichnung angeordnet sind. Wir unterscheiden die gleichmäßig starken Stäbchen a a, die oben durch die sogenannte Pigmentschicht b miteinander verbunden sind, von den tiefer zwischen den Stäbchen liegenden Zapfen c c. Sie alle sind Enden von Nerven, die sich bis zu den betreffenden Gehirnzentren fortsetzen. Wir sehen, daß die Stäbchen zwischen den Zapfen sehr ungleich verteilt sind. Die empfindlichste Stelle des Auges, die Mitte des gelben Fleckes, besteht fast ausschließlich aus Zapfen, und von hier aus nehmen die Stäbchen nach den entfernteren Teilen der Netzhaut hin regelmäßig zu. Da die Empfindlichkeit des Auges für Farben mit der Zunahme der Stäbchen abnimmt, so durfte man annehmen, daß den beiden Arten von Nervenendigungen besondere Funktionen zuerteilt sind, und daß die Zapfen hauptsächlich oder ausschließlich der Farbenempfindung, die Stäbchen der Lichtstärke-Auffassung dienen. Völlige Klarheit hat die Forschung hierüber noch nicht verbreitet.



Stäbchen und Zapfen der Netzhaut.
a Stäbchen, b Pigmentschicht, c Zapfen, d Nervenzellen.

Die über den Stäbchen ausgebreitete Pigmenthaut färbt sich rot, wenn die Netzhaut von keinem Lichte getroffen wird. Es bildet sich der sogenannte **Sehpurpur**, der aber sofort zersetzt und durch das Licht farblos wird. Er spielt vielleicht eine ähnliche Rolle wie das Silbersalz in unserem gewöhnlichen photographischen Prozeß. Bei jedem Pulsschlage wird die Netzhaut von frischem Sehpurpur überrieselt, die photographische Platte wird von einer neuen Emulsionsschicht überzogen. Sind aber die wirkenden Lichtmengen zu groß, so kann die Erneuerung nicht so schnell geschehen wie die Zersetzung, und das Auge wird unempfindlicher. Schließt man dagegen das Auge längere Zeit vom Licht ab, so bildet sich eine viel dickere Schicht von Sehpurpur; das Auge wird für eine kurze Zeit ganz besonders lichtempfindlich. Dabei zeigt es sich aber, daß die Farbenempfindlichkeit nicht in gleichem Maße wächst, ja daß das Auge sogar nach langem Schließen im ersten Augenblicke die Farben schlechter unterscheidet als gewöhnlich. Für die Empfindung der Farben kann die Zersetzung des Sehpurpurs keine oder doch nur eine untergeordnete Rolle spielen, denn er dient nur zur Auffassung der Lichtstärke. Seine Zersetzung ist ein chemischer, durch die Lichtwellen ausgelöster Prozeß. Möglicherweise wirkt nun das dadurch entstehende chemische Produkt je nach seiner Menge, d. h. je nach der wirksamen Lichtmenge, in derselben Weise einen Reiz auslösend auf die Nervenendigungen ein, wie etwa eine Säure auf die Empfindungsnerven unserer Haut.

Ist auf diese Weise die Auffassung der Lichtstärke der verschiedenen Punkte des Netzhautbildes wenigstens anschaulich gemacht, so bietet die Erklärung der **Farbenempfindung** noch

immer erhebliche Schwierigkeiten. Eine direkte materielle Erschütterung der Zapfen durch die Lichtwellen kann nicht angenommen werden, wie fein für unsere Auffassung auch jene Fäserchen sind. Die Ätherschwingungen finden in einer Welt zwischen der der groben Materie statt, auf deren Teile sie sonst nirgends eine direkt bewegende Wirkung ausgeübt haben, die sich unzweifelhaft nachweisen ließe. Sie greifen immer nur die molekularen Welten an, aus denen sich jene größeren in uns ewig unsichtbarer Weise zusammensetzen. Wir brauchen also jedenfalls noch eine Vermittelung durch einen anderen molekularen Vorgang, wie wir ihn z. B. für die Empfindung der Lichtstärke in einem chemischen Prozesse fanden. Es bleibt für uns keine andere Möglichkeit, als auch für die Farbenempfindung einen solchen oder einen elektrischen Vorgang anzunehmen. Ohne uns mit dem Wesen der chemischen oder elektrischen Erscheinungen bisher befaßt zu haben, begreifen wir doch, daß nicht für jede der scharf getrennt wahrnehmbaren Farbenabstufungen etwa eine besondere chemische Reaktion angenommen werden kann, die auf jedem Punkte der Netzhaut bei der Auffassung eines vielfarbigen Bildes verschieden und von den umliegenden Elementen getrennt sein müßte. Es muß eine Vereinfachung für die Farbenwahrnehmung auffindbar sein.


Farbendiagramm.

Die Technik der Malkunst gibt uns hier einen wichtigen Fingerzeig. Sie lehrt, wie man aus wenigen Grundfarben eine große Anzahl, ja überhaupt alle in der Natur vorkommenden Mischfarben hervorbringen kann. Eine genauere Untersuchung ergab Rot, Gelb und Blau als diejenigen Grundfarben, aus deren Mischung alle Spektralfarben in ihrer natürlichen Reihenfolge hergestellt werden können. Wenn man ein Farbendiagramm von der Form eines abgestumpften Dreiecks zeichnet, wie es die nebenstehende Figur darstellt, und in diesem Dreieck irgend eine gerade Linie zieht, die den mit W bezeichneten Kreis schneidet, so vereinigen sich die Farben, die den Schnittpunkten der Linie mit den Dreiecksseiten entsprechen, zu Weiß; es sind **Komplementärfarben.** Die zu solcher Vereinigung zu Weiß nötigen Mengen der beiden Farben werden durch die Länge der Linienabschnitte zu beiden Seiten von W angegeben. Wir erfahren also hier die merkwürdige Tatsache, daß keineswegs die Vermischung aller Spektralfarben nötig ist, um Weiß zu erzeugen, während aus der Zerlegung des weißen Lichtes diese Farben entstehen, sondern daß dieses Weiß durch zusammenwirkende **Farbenpaare** hervorgebracht wird.

Ein jüngst von **Jolly** angewendetes Verfahren zur **Photographie in natürlichen Farben** macht von diesen Erfahrungen über die **Dreifarbentheorie** von **Young** und **Helmholtz** Gebrauch. Zur Aufnahme benutzt man Farbenfilter von diesen Grundfarben, d. h. man macht je eine Aufnahme von dem betreffenden Gegenstand auf einer wie gewöhnlich präparierten Platte durch eine farbige Scheibe oder eine zwischen planparallelen Gläsern eingeschlossene farbige Lösung, die immer nur eine jener drei Grundfarben durchläßt. Hierdurch sondert man die Farben wie durch ein **Filter** aus. Denn bei der Aufnahme durch das rote Filter wird Silber auf der Platte nur in dem Verhältnis niedergeschlagen, in welchem diese Grundfarbe in dem optischen Bild enthalten war, und ebenso ist es bei den beiden anderen Aufnahmen. Die drei wie gewöhnlich schwarz-weißen Negativbilder geben an, in welchem Verhältnis die drei Grundfarben in jedem Punkte des Bildes an der Mischung der einzelnen Farbentöne beteiligt sind. Durch ein Positivverfahren werden dann wiederum die drei Grundfarben übereinander in dem natürlichen Verhältnis kopiert. Durch die Abbildungen auf der Tafel bei S. 42 ist dieses Verfahren praktisch erläutert. Stellt man auf gewöhnliche Weise von den Negativen Diapositive her,

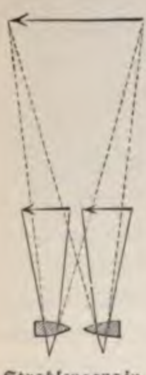
so kann man durch ein dreifaches Skioptikon, in welchem die drei Bilder wieder durch ihre Farbenfilter aufeinander projiziert werden, lebensgroße Wiedergaben dieser farbigen Naturaufnahmen objektiv vorführen, die oft einen geradezu entzückend wahrheitsgetreuen Eindruck machen.



Dreifaches Skioptikon zur Projektion in natürlichen Farben.

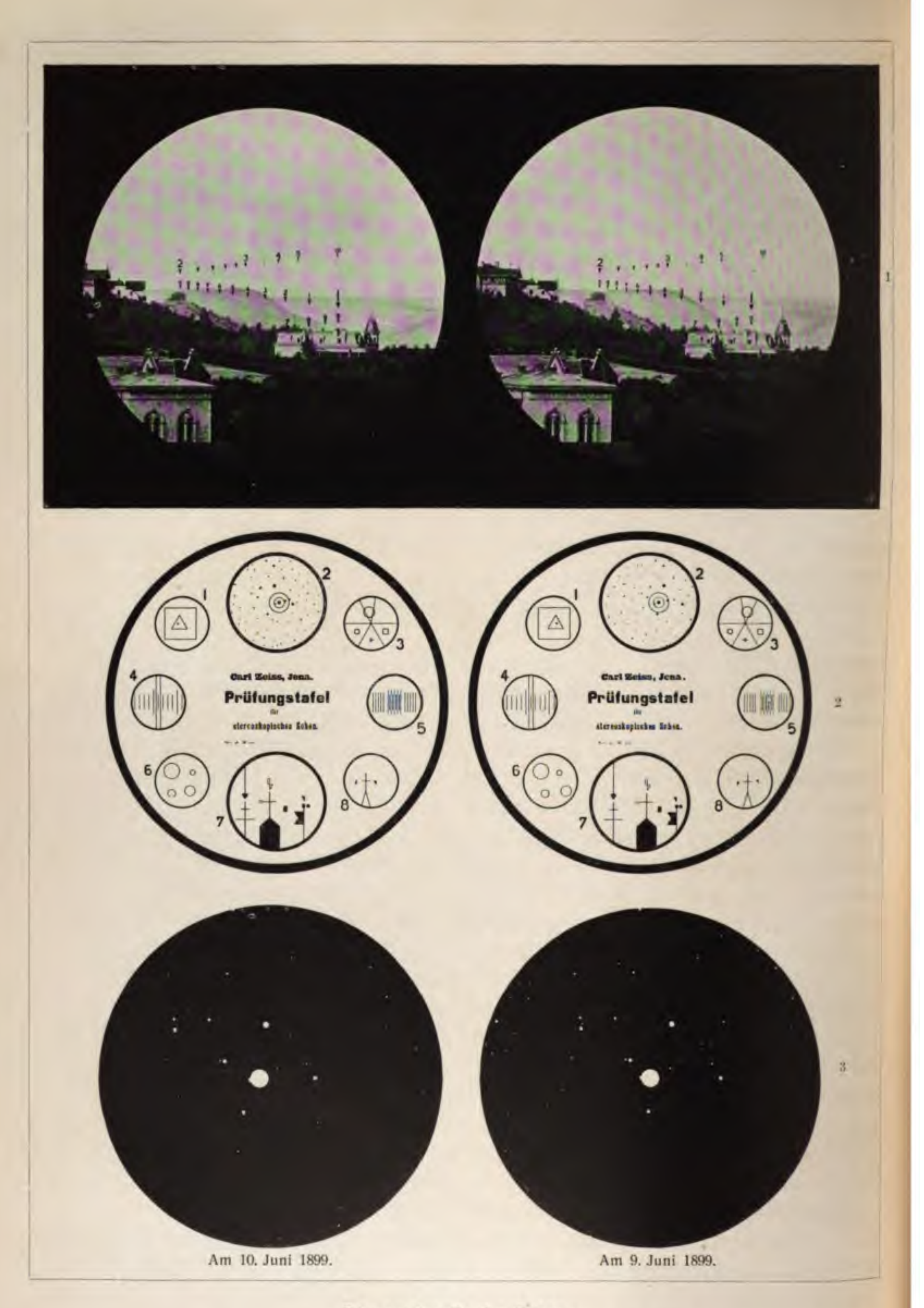
Wir haben gerade diese Methode, farbige Photographien darzustellen, aus den verschiedenen heute angewendeten herausgegriffen, weil nach dem Urteil der betreffenden Fachgelehrten das Zustandekommen der Farbenempfindung in unserem Auge durch die gleiche Vermischung von drei an sich getrennten, den drei Grundfarben entsprechenden Nerveneindrücken hervorgerufen wird. Man kann sich vorstellen, daß die Sehzapfen von dreifach verschiedener Art oder dreifach gespalten seien, und daß jede der drei Grundfarben eine besondere chemische Reaktion hervorruft, die wieder nur auf eine bestimmte der drei Zapfenarten oder Teilungen wirkt. Die physiologische Forschung hat bis jetzt noch nicht tief genug in die allerletzten Feinheiten unseres Organismus eindringen können. Wir müssen es der Zukunft überlassen, hier völlige Klarheit zu schaffen.

Das auf der Netzhaut wie auf der photographischen Platte entstehende Bild ist flach; es unterscheidet unmittelbar keinerlei Tiefen, es sieht nicht körperlich. Für die Zwecke des täglichen Lebens, ja in vielen Fällen zur Erhaltung desselben im Kampfe mit feindlichen Elementen ist das körperliche Sehen, das Schätzen von Entfernungen notwendig. Deshalb haben wir zwei Augen. Für die Ausmessung von Entfernungen allein würden wir wohl mit nur einem optischen Apparat auskommen. Wir haben auf Seite 231 einen Entfernungsmesser beschrieben, dessen Prinzip auf der Veränderung der Einstellung auf verschieden weit entfernte Objekte beruht. Gewisse Vögel haben wirklich in ihrem Auge eine ähnliche Vorrichtung, denn für sie ist es von besonderer Wichtigkeit, für die Bestimmung der Flugrichtung schnell und sicher Entfernungen abschätzen zu können. Da bei ihnen die beiden Augen sehr nahe beieinander liegen, wurde die im folgenden beschriebene Art der Distanzmessung, welche wir anwenden, zu unsicher. Körperlich sehen aber kann man nur mit zwei Augen, die für uns die beiden Aufgaben vereinigen.



Strahlengang in Brewsters Linsenstereoskop. Vgl. Text, S. 267.

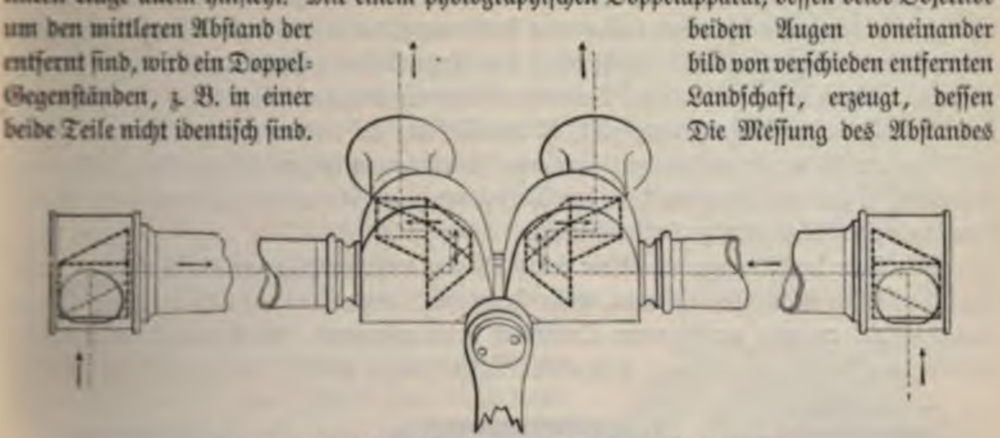
Will der Geometer die Entfernung eines Gegenstandes ausmessen, den er nicht erreichen kann, so schafft er zwischen sich und ihm ein Dreieck, indem er ihn von zwei verschiedenen Punkten anvisiert. Die Verschiedenheit der Richtungslinien von diesen beiden Endpunkten seiner Standlinie gibt ihm den Winkel an dem fernen Gegenstand und damit alle Bestimmungsstücke des Dreiecks, also auch die Länge der Richtungslinien, wenn die der Standlinie bekannt ist. Dies ist das Prinzip, nach welchem das Auge Entfernungen schätzt. Die Standlinie ist die Entfernung der beiden Augen voneinander, deren jedes von seinem Standpunkt aus ein etwas verschiedenes Bild von der Außenwelt gibt. Man kann sich davon leicht überzeugen,



Stereoskopische Bilder.

1. Landschaftsaufnahme mit Entfernungsmarke nach *Zeiss*. — 2. Prüfungstafel für die Feinheit stereoskopischen Sehens. — 3. Saturn im Sternbild des Schlangenträgers, zusammengestellt nach Aufnahmen von Prof. *M. Wolf* in Heidelberg.

wenn man z. B. eine ferne Landschaft durch ein Fenster ansieht. Das nahe Fensterkreuz wird vor einer anderen Stelle der Landschaft erscheinen, je nachdem man mit dem rechten oder dem linken Auge allein hinsieht. Mit einem photographischen Doppelapparat, dessen beide Objektive um den mittleren Abstand der beiden Augen voneinander entfernt sind, wird ein Doppelbild von verschieden entfernten Gegenständen, z. B. in einer Landschaft, erzeugt, dessen beide Teile nicht identisch sind. Die Messung des Abstandes



Prisma-Anordnung und Strahlengang im Reliefferurohr.

gleicher Gegenstände auf den korrespondierenden Bildern unserer hier beigehefteten Tafel „Stereoskopische Bilder“ voneinander zeigt, daß dieser Abstand bei nahen Objekten kleiner ist als bei entfernteren. Dasselbe muß bei den beiden Bildern auf der Retina stattfinden. Durch ein einfaches Sehwerkzeug, das **Stereoskop**, dessen optisches Verhalten wohl aus der unteren Zeichnung auf S. 266 unmittelbar hervorgeht, bringt man zwei nach der angeführten Methode hergestellte Aufnahmen in unseren Augen ebenso zur Deckung, wie es beim direkten Sehen geschieht, und hat dadurch den Eindruck der natürlichen Plastik.

Es hat sich gezeigt, daß die beiden Augen ungemein feinfühlig für die geringsten Unterschiede zweier solcher Bilder sind, wovon man sich durch unser zweites stereoskopisches Bild der Tafel überzeugen kann, das durch geometrische Konstruktion hergestellt wurde. Im Stereoskop fallen hier Verschiedenheiten der Lage von je zwei scheinbar identischen Linien- oder Figurengruppen sofort durch verschiedene Tiefenlage auf, die man mit dem gewöhnlichen Augenmaße nicht mehr und selbst durch genaueste mikrometrische Messung oft nur schwer erkennen würde. Diese Erkenntnis hat in jüngster Zeit zur Konstruktion eines neuen Distanzmessers geführt, dessen Prinzip für die Meßkunst überhaupt von großer Bedeutung zu werden verspricht. Schon seit einigen Jahren werden sogenannte Reliefffernrohre angefertigt,



Reliefffernrohr in gestreckter Stellung. Vgl. Text, S. 268.

bei denen durch total reflektierende Prismen bei einer Anordnung, wie sie aus der oberen Zeichnung hervorgeht, die dem stereoskopischen Sehen zu Grunde liegende Basisentfernung der beiden Augen wesentlich vergrößert wird. Solche Fernrohre bieten durch die größere Plastik, mit der sie zu sehen gestatten, nicht nur einen weit höheren Genuß, sie fördern auch im allgemeinen

ganz wesentlich das deutliche Sehen. Nun hat die Firma Zeiß in Jena im Gesichtsfelde solcher eigens für die Messung der Entfernung konstruierten Reliefffernrohre (s. die untere Abbildung, S. 267) eine Skala anbringen lassen, wie sie dem ersten Stereoskopbilde der Tafel übergedruckt ist. Jede Marke entspricht einer bestimmten Entfernung, so daß man diese Entfernung selbst unmittelbar ablesen kann. Eine solche durch das bloße Sehen geschehende Distanzmessung ergibt überraschend genaue Resultate. Bei einem Entfernungsmesser, dessen Basis 51 cm beträgt, und der achtmalige Vergrößerung gibt, ist die Messung bei 500 m nur um 10 m ungenau, bei 1 km um 35 m; bei entsprechend größeren Instrumenten steigert sich die Genauigkeit noch wesentlich, so daß mit ihnen die Höhe der Wolken durch den bloßen Anblick wenigstens bis auf Bruchteile von Kilometern zu bestimmen sind.

Mit Hilfe der Photographie kann man sich eine noch viel sicherere Basis für das stereoskopische Messen verschaffen als durch solche Fernrohre, indem man ein und denselben Gegenstand zugleich an zwei verschiedenen Orten der Erde aufnimmt. Man bringt nachher beide Bilder stereoskopisch zur Deckung. Das oben erklärte Prinzip gestattet, die Unterschiede derselben

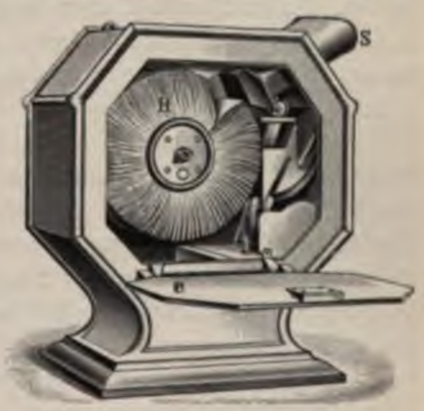


Stereoskopischer Entfernungsmesser.

zu messen. Unter diesen Gesichtspunkten ist der Stereokomparator von Pulfrich entstanden, der die Anwendung des stereoskopischen Sehens bis in die fernsten Himmelsräume hinein ermöglicht. Da nämlich die Erde sich mit uns durch ihre jährliche Bewegung um die Sonne im Raume fortbewegt, können wir uns eine Basis für das stereoskopische Sehen verschaffen, die so groß ist wie der Durchmesser der Erdbahn, 40 Millionen Meilen. Perspektivische Verschiebungen von Sternen, die hierdurch entstehen, nennt man ihre Parallaxe; sie sind das einzige Mittel, etwas über die ungeheuern Entfernungen der übrigen Sonnen von uns zu erfahren. Die Ausmessung solcher Parallaxen auf dem gewöhnlichen Weg ist äußerst schwierig; durch den Gebrauch unserer beiden Augen zugleich bei der Ausmessung im Stereokomparator wird die Genauigkeit solcher Messungen zweifellos wesentlich vergrößert. Unser drittes Bild auf der Tafel bei S. 267 ist eine derartige stereoskopische Himmelsaufnahme, die auf einer Basis beruht, welche die Erde in einem Tage durcheilt. Im Stereoskop würden wir sehr deutlich sehen, daß der 180 Millionen Meilen entfernte Planet Saturn uns näher ist als die für uns unendlich weit entfernten Fixsterne, von denen wir auch den größten Mond des Planeten, Titan, unterscheiden, der gleichfalls frei im unendlichen Raum etwas hinter seinem Planeten schwebt. Der unmittelbare Anblick dieser Körperlichkeit bis in so unendlich große Entfernungen des Weltraumes hinein hat etwas unbeschreiblich Erhebendes.

Blanke Gegenstände, die Spiegelfläche des Wassers, poliertes Metall, Glas, zeigen einen eigentümlichen Glanz, den der Maler oder die einfache Photographie nicht wiederzugeben vermag. Dagegen erscheint dieser Glanz wieder in stereoskopischen Photogrammen. Zu seiner Erweckung gehört also ein Doppelbild. Der Grund davon ist ein eigentümlicher Widerstreit der beiden Netzhauteindrücke, der sich physiologisch erklären läßt. Ebenso erzeugen verschiedenfarbige

Eindrücke der beiden Augen Metallglanz. Zeigt das eine Bild die Komplementärfarbe vom anderen, so vereinigen sich beide beim stereoskopischen Sehen zu einem weiß-schwarzen Bilde. Dies benutzt man bei einer interessanten Methode, Bilder herzustellen, die die Gegenstände körperlich auch ohne Anwendung eines Stereoskopes wiedergeben. Die beiden stereoskopisch verschiedenen Bilder werden übereinander gedruckt und zwar das eine in der Komplementärfarbe des anderen. Sieht man nun dieses für das bloße Auge undeutliche Bild durch eine Brille an, von der je ein Glas dieselbe Farbe hat wie eines jener übereinander gedruckten Bilder, so tritt sofort der plastische Eindruck ein. Ist das eine Bild blau, das andere gelb, so sieht das mit einem blauen Glase versehene Auge nichts oder doch nur wenig von dem blauen Bilde, während das gelbe Bild mit dem Blau des Brillenglases schwarz-weiß wird. Das Umgekehrte geschieht mit dem anderen Auge. Jedes sieht also nur eines der beiden stereoskopischen Bilder. Die beiden verschiedenfarbigen Bilder als Diapositive kann man in beliebiger Größe übereinander durch ein Skioptikon projizieren und dadurch einem ganzen Auditorium, das freilich mit jenen verschiedenfarbigen Brillen versehen sein muß, objektiv plastisch wirkende Bilder vorführen, während sonst das stereoskopische Sehen nur subjektiv möglich ist.



Mutoskop. S Einblick; H Bildwalze.

Auf einer rein physiologischen Eigenschaft des Auges, welche dasselbe mit allen anderen Nervenendigungen teilt, beruht ein in jüngster Zeit sehr beliebt gewordenes Instrument, der Kinematograph oder das Mutoskop. Wir haben schon öfters zu erwähnen nötig gehabt, daß Nerveneindrücke, die in kürzerer Zeit als $^1/_{10}$ bis $^1/_{12}$ Sekunde aufeinander folgen, nicht mehr als getrennte Reize wahrgenommen werden können. Nimmt man von einer bewegten Handlung photographische Aufnahmen in kürzeren Zwischenräumen auf und bietet sie auf einer drehbaren Walze genau aufeinanderpassend in rascher Folge hintereinander direkt dem Auge dar oder projiziert sie unter denselben Bedingungen auf eine weiße Wand, so wird das Auge alle diese Eindrücke wieder zu der bewegten Handlung vereinigen. Bei dem oben abgebildeten Mutoskop ist die sehr einfache Art der direkten Wiedergabe unmittelbar ersichtlich.

Wir haben uns im Vorangehenden viel mit farbigen Gegenständen, farbigen Bildern u. s. w. beschäftigt. Woher kommen diese Farben? Sie gehören den Gegenständen, wenn diese nicht selbstleuchtend jene Farben ausstrahlen, nicht an, denn durch verschiedenartige Beleuchtung können sie diese Farben ändern. Bestrahlen wir einen blauen Gegenstand mit rein gelbem Lichte, so erscheint er farblos schwarz; dasselbe findet statt, wenn wir ihn durch ein gelbes Glas betrachten. Das scheint völlig im Widerspruch mit unserer Behauptung auf S. 265, daß solche komplementären Farben sich zu Weiß vereinigen. Würden wir Lichtstrahlen durch ein blaues und ein gelbes Glas zugleich auf eine weiße Fläche fallen lassen, so bliebe diese in der Tat weiß. Nur da, wo ein Gegenstand bei dieser doppelfarbigen Beleuchtung Schatten wirft, erscheint die Farbe der diesen Schatten nicht erzeugenden Lichtquelle.

Es geht hieraus hervor, daß die meisten Gegenstände und Substanzen unter den Wellenlängen des Lichtes, das auf sie fällt, eine Auswahl treffen. Eine völlig durchsichtige Substanz, wie etwa farbloses Glas, läßt alle auf dasselbe stoßenden Lichtwellenlängen durchgehen ohne

wesentliche Absorption, und eine weiße Fläche oder ein Spiegel wirft alle Lichtwellen zurück. Anderseits gibt es gänzlich undurchsichtige und schwarze Körper, die kein Licht durchlassen oder zurückwerfen, und andere, die nur für eine gewisse Wellenlänge oder für eine bestimmte Auswahl derselben empfänglich sind. Rotes Glas läßt allein Lichtwellen von der ganz bestimmten seiner Farbe zukommenden Länge durch; alle anderen vernichtet es in seinem Inneren, d. h. verwandelt es in andere molekulare Bewegungen, die uns nicht den Eindruck von Licht machen, hauptsächlich in Wärme. Ein undurchsichtig roter Gegenstand absorbiert in derselben Weise in seinen Oberflächenschichten alle nicht roten Lichtwellen; die roten allein sendet er wieder aus. Schon hieraus geht hervor, daß solch ein farbiger Gegenstand nicht absolut undurchsichtig sein kann, denn damit diese Auswahl der Wellenlängen stattfindet, muß das Licht notwendig bis zu einer gewissen Tiefe eindringen. Das von solchen Substanzen in dünnen Schichten noch durchgelassene Licht wird aus denjenigen Wellenlängen bestehen, die von ihr nicht zurückgeworfen werden. In der Durchsicht zeigen die Stoffe die komplementäre Farbe zu der in der Aufsicht in Erscheinung kommenden Färbung. Durch das Experiment wird dies bestätigt, denn durch dünnes Blattgold gesehen erscheinen weiße Gegenstände grünlichblau, im Gegensatze zu seiner gelben Farbe in der Aufsicht.

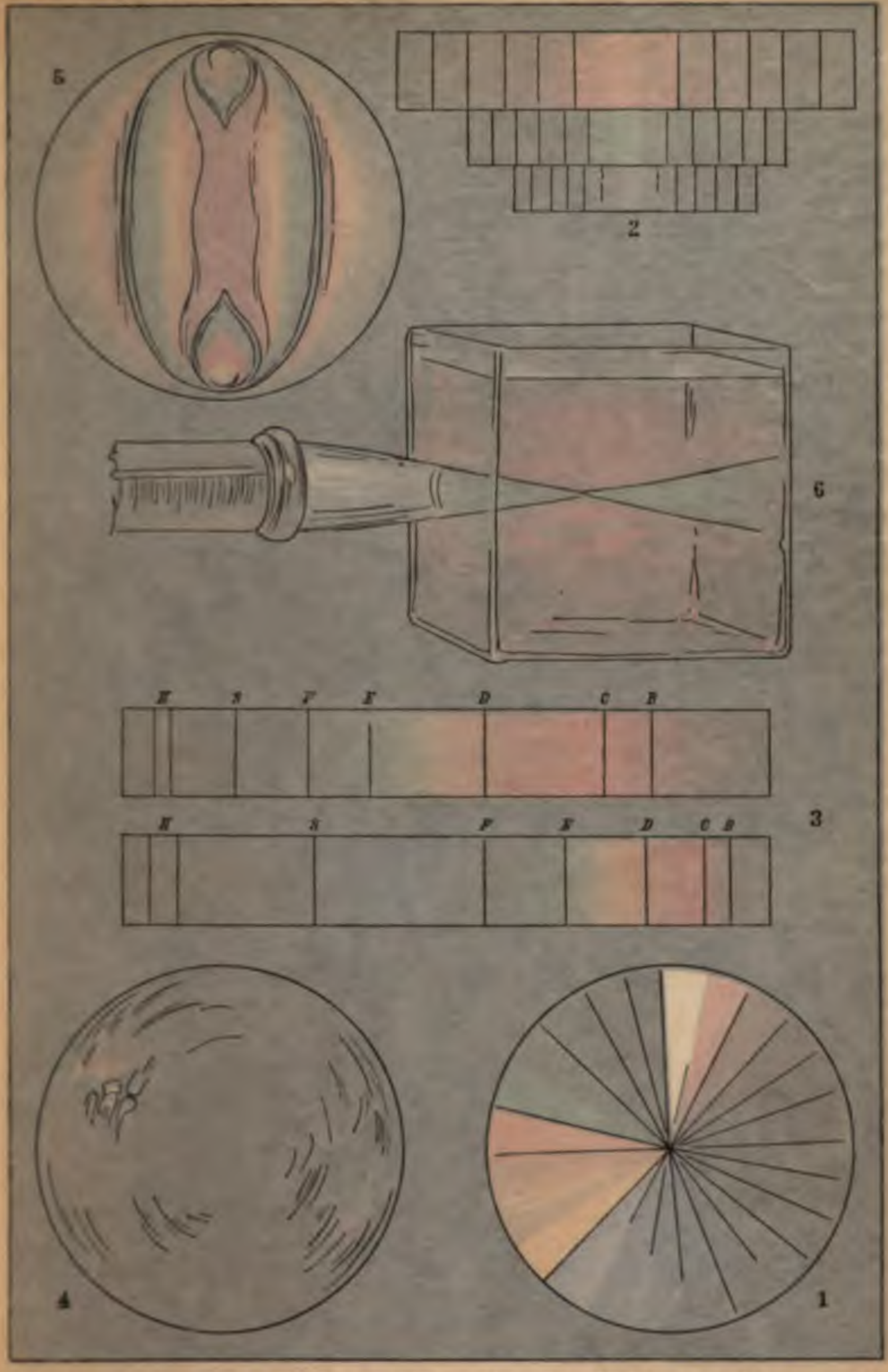
Die Vorliebe besonderer Stoffe, bestimmte Wellenlängen in sich aufzunehmen, zu absorbieren, erklärt sich uns leicht aus ihrem spektroskopischen Verhalten. Sie hängt, wie dieses, mit dem Aufbau ihrer molekularen Weltsysteme zusammen, die ihren chemischen Charakter bedingen. Wie deshalb jeder Stoff seine unveränderlichen Spektrallinien besitzt, so hat er auch für das bloße Auge seine unveränderliche Oberflächenfarbe. Ändert sich diese, so kann man sicher sein, daß auch der molekulare Zustand des Stoffes sich verändert, daß er also auch sonst andere Eigenschaften angenommen hat.

Da ein gelber undurchsichtiger Gegenstand von dem auf ihn fallenden weißen Licht alle nicht gelben Wellenlängen hinweggenommen hat, also insbesondere keine blauen Strahlen in unser Auge gelangen läßt, ein blaues durchsichtiges Glas aber nur diese durchläßt, so bleibt nach dieser doppelten Absorption überhaupt keine Lichtsorte mehr übrig, die in unser Auge gelangen könnte: der Gegenstand muß lichtlos, schwarz erscheinen.

Das entzückende Bild der farbenreichen Natur rings um uns her dankt seine Entstehung zum größten Teile dem tausendfältigen Spiele dieser Oberflächenfarben. Die Organismen, für die das Licht eine Lebensbedingung ist, begnügen sich stets nur mit einem Teile der Lichtwellen der Sonnenstrahlen, die sie umfließen, und verschönen durch das zurückgegebene Licht das Bild der Welt für ihre Mitgeschöpfe. So sind es insbesondere die Pflanzen, welche die blauen und violetten Strahlen zu ihrem Atmungsprozesse, der den Sauerstoff für die Tierwelt abgibt, und die roten Strahlen wegen ihres Wärmegehaltes gebrauchen; sie können nur die Strahlen des mittleren Teiles des Spektrums, die grünen, entbehren; daher ihr grüner Blätterschmuck. Die vielfarbigen Blütenblätter dagegen sind nur ein Hochzeitskleid und dienen nicht mehr der allgemeinen Ernährung des Organismus: auf eine in erster Linie nützliche Auswahl der Lichtwellen verzichten sie und können in allen Farben spielen. Die tierischen Organismen bedürfen des Lichtes überhaupt nicht mehr als unmittelbare Lebensbedingung. Ihre Farben sind nur Lock- oder Schutzmittel, weshalb hier eine noch größere Vielseitigkeit eintreten konnte. Man denke nur an die farbenprunkende Welt der Falter.

Aber nicht nur die Oberflächenfarben setzen das Bild der Natur zusammen. Das Blau des Himmelsgewölbes und die hehre Pracht der Sonnenuntergangsfarben entstehen durch eine

[Zur Tafel *Farbige Lichterscheinungen.*]



1. S. 234: Farbenscheibe. — 2. S. 272: Interferenzstreifen verschiedenfarbigen Lichtes. — 3. S. 274: Beugungs- und prismatisches Spektrum. — 4. S. 275: Seifenblase zur Veranschaulichung von Farben dünner Blättchen. — 5. S. 283: Gepreßtes Glas im polarisierten Lichte. — 6. S. 285: Fluoreszenz des Eosin.

Absorption des Lichtes in der unvollkommen durchsichtigen Luft, bezw. durch Strahlenbrechung in ihr. Der Regenbogen, die farbigen Mond- und Sonnenhöfe sind Brechungserscheinungen, die von den in der Luft schwebenden Wasserbläschen oder Eiskristallen hervorgerufen werden.

k) Die Beugungserscheinungen des Lichtes.

Als wir in unseren vorangegangenen Betrachtungen zuerst das weiße Licht in seine Spektralfarben zerfallen sahen und es uns darauf ankam, diese Erscheinung als eine Bewegung von Ätherwellen verschiedener Länge zu erfassen, bedienten wir uns des Fresnelschen Interferenzversuches zu diesem Nachweis (S. 238). Wir greifen auf diesen Versuch zurück, um verwandte Erscheinungen zu erläutern, die eine wichtige Rolle für die Theorie sowohl wie die praktische Anwendung spielen.

Damals sahen wir, wie zwei Strahlenbündel einfarbigen Lichtes, die sich unter sehr spitzem Winkel schneiden, ihre Wirkungen gegenseitig an bestimmten Stellen aufheben, nämlich da, wo die Lichtschwingungen der beiden Strahlen um eine halbe Wellenlänge auseinander sind. Dann bilden sich auf einer den Strahlen gegenüberliegenden Fläche aus einer ursprünglichen Lichtlinie eine Reihe von hellen und dunkeln Streifen, die man als Interferenzerscheinungen bezeichnet.



Beugung des Lichtes.

Es zeigt sich nun, daß solche Streifen auch auftreten, wenn man nur eine Lichtquelle, ein Strahlenbündel benutzt. Läßt man ein solches auf einen feinen Spalt fallen, so daß also nur Licht aus dieser einen Richtung durch den Spalt gelangen kann (s. die nebenstehende Abbildung), so erscheinen auf dem Schirm dieselben Beugungsstreifen. Es kann dies nur daher rühren, daß außer dem geradlinig verlaufenden Strahl von dem Spalt unter einem sehr kleinen Winkel auch noch andere Strahlen ausgehen, die sich mit benachbarten, weniger oder mehr abgelenkten kreuzen und dadurch jene stehenden Lichtwellen hervorbringen. Wie diese Seitenstrahlen entstehen, darüber hat man verschiedene Meinungen ausgesprochen und Theorien aufgestellt. Für uns ist es eine Brechungserscheinung wie jede andere. Wir wissen, daß die festen Körper keineswegs aus einer zusammenhängenden Masse bestehen, daß vielmehr zwischen den sie zusammensetzenden Molekularsystemen sehr große Lücken sich befinden müssen. An der Oberfläche der Körper werden diese Lücken größer; es findet ein Übergang gegen die umgebende Luft hin statt, die ihrerseits gegen die Körper hin dichter wird und eine Atmosphäre um sie bildet, deren besondere physikalische Einflüsse erst in jüngster Zeit näher betrachtet werden. An der Oberfläche der Körper sind also auch ihre optischen Eigenschaften andere. Wo an der scharfen Kante des Licht beugenden Spaltes die Moleküle der Ränder immer geringer an Zahl werden, wird der sonst lichtundurchlässige Stoff durchsichtig und bricht die ihn durchdringenden Strahlen. Hieran ist sowohl der feste Stoff als die ihn umgebende Luft beteiligt, und es ist demnach nicht zu verwundern, daß die durch bloße Streifung entstandenen Brechungserscheinungen ihrem Wesen nach etwas anderes sind als bei gewöhnlichen gebrochenen Strahlen.

Das Licht braucht aber nicht durch einen Spalt, sondern kann durch eine anders gestaltete Öffnung O fallen und ihr entsprechende Beugungsfiguren bilden, wie sie S. 272 oben abgebildet

sind. Eine kleine kreisrunde Öffnung wird demnach von einer Anzahl heller, nach außen hin schnell lichtschwächer werdender Ringe umgeben. Das kann man am deutlichsten durch ein Fernrohr wahrnehmen, dessen Objektiv man bis auf eine solche kleine Öffnung verdeckt hat. Dieselben Beziehungen müssen vorhanden sein, wenn man bei voller Objektivöffnung einen aus dunkelm Himmelsgrunde hervorleuchtenden Stern betrachtet. Der Stern hat dann solche sogenannte Diffraktionsringe (s. die untere Abbildung). Weil die ersten sich dicht an das Bild des Sternes legen, vergrößern sie seinen scheinbaren Durchmesser, so daß er, obgleich für unsere Sehschärfe eigentlich ganz durchmesserlos, doch als Scheibchen erscheint. In ein und demselben Fernrohr nimmt die Größe dieses Scheibchens mit der Helligkeit des Sternes zu, weil man entsprechend mehr nach außen hin schnell schwächer werdende Diffraktionsringe noch unterscheiden kann. Für denselben Stern nimmt die Größe des Scheibchens mit der Brennweite des Fernrohrs ab, denn die von den gegenüberliegenden Rändern des entfernteren Objektivs gebrochenen Beugungsstrahlen schließen einen kleineren Winkel ein als die bei kleineren Fernrohren. Es entsteht hierdurch die dem Laien auffällige Erscheinung, daß die vollkommeneren größeren Sehwerkzeuge die Fixsterne nur immer kleiner erscheinen lassen, insbesondere kleiner als mit dem bloßen Auge, das wegen seiner kleinen Brennweite sehr starke Beugungserscheinungen zeigt. Ein vollkommenes Fernrohr soll einen Punkt auch wieder als Punkt abbilden. Entsteht aus dem Punkt im Fernrohr irgend eine Figur, so müssen auch die ihn umgebenden Diffraktionsringe diese Figur haben, müssen deformiert erscheinen. Ihre Untersuchung bietet also ein sehr scharfes Prüfungsmittel für die Güte eines Objektivs. Bei der Anwendung verschiedener Lichtarten in unseren Versuchen über die Beugungserscheinungen durch einen Spalt wird die Entfernung der Streifen voneinander am größten beim roten und am geringsten beim violetten Licht. Wir haben ja schon beim Fresnelschen Versuch gefunden, daß diese Entfernung der Streifen den betreffenden Wellenlängen proportional sein muß, die wir darum aus jener Streifenbreite bestimmten. Auf unserer Tafel „Farbige Lichterscheinungen" bei Seite 270 sind in Figur 2 solche farbige Beugungsstreifen nebeneinandergestellt.



Beugungserscheinung. O Durchgangsöffnung des Lichtes. Vgl. Text, S. 271.



Diffraktionsringe.

Die verschiedene Wirkung der Beugung auf die einzelnen Farben gibt ein Mittel an die Hand, ein sogenanntes Beugungsspektrum herzustellen, das wesentliche Vorteile vor dem durch Prismen entworfenen hat. Es läßt sich auf rein geometrischem Wege zeigen, daß aus der Wirkung einer großen Anzahl sehr nahe beieinander befindlicher Spalten, also eines sehr feinen Gitters, durch die vielfache Durchkreuzung der Beugungsstrahlen statt der farblosen Beugungsstreifen eine Anzahl von vollständigen Spektren entsteht, die sich ebenso wie jene Streifen von der Mitte aus zu beiden Seiten symmetrisch ordnen, so daß alle diese Spektren links und rechts ihre violette Seite immer nach innen, die rote nach außen kehren. Dabei vermischen sich einige dieser Seitenspektren wieder zu Streifen

weißen Lichtes. Es muß nun zwischen der Wellenlänge λ, dem Abstande der Spaltlinien des Gitters b und dem Ablenkungswinkel des beobachteten Beugungsbildes α die einfache Beziehung: $\lambda = b \sin \alpha$ bestehen. Dies alles läßt sich auf einfache Weise geometrisch als notwendig nachweisen. Unsere moderne Technik hat es verstanden, außerordentlich feine Beugungsgitter herzustellen, indem man auf Metall oder Glas mit einer Teilmaschine feine Risse eingraviert und dann die von den Rändern reflektierten statt der beim Durchgang durch einen Spalt gebeugten Strahlen benutzt. Der Amerikaner Rowland hat Gitter angefertigt, die auf 1 mm 1700 Linien haben, so daß also der Abstand dieser Linien voneinander, die Größe b, nur 0,000588 mm beträgt und demnach genau von der Ordnung der zu messenden Wellenlängen ist. Die Wellenlänge der Natriumlinien ist noch immer etwas größer als dieser von Menschenhand in genau meßbarer Weise hergestellte Abstand zweier Linien.

Solche Gitter erzeugen Spektren von so außerordentlicher Ausdehnung, wie sie Prismen nicht mehr zu entwerfen vermögen. Deshalb werden für genauere Untersuchungen nur noch Gitterspektren benutzt, die allein für eine völlig einwandfreie Messung der Wellenlängen des Lichtes dienen. Man braucht zu diesem Zweck, nach Maßgabe der vorhin gegebenen Formel, nur den Ablenkungswinkel der betreffenden Spektrallinie auf die Weise zu messen, wie wir es auf S. 210 beschrieben haben. Dies ist mit aller gewünschten Genauigkeit möglich. Die noch weiter nötige Größe b kann gleichfalls mit genügender Sicherheit aus der Messung der ganzen Gitterlänge und Abzählung der darin enthaltenen Linien ermittelt werden. Die Multiplikation dieser konstanten Größe b mit dem Sinus des Ablenkungswinkels der beobachteten Spektrallinie gibt unmittelbar die Wellenlänge ihres Lichtes.

Hieraus entsteht die Möglichkeit, die Maßeinheit überhaupt, das Meter, durch diese ungemein kleinen Lichtschwingungen zu kontrollieren, oder eine absolute Maßeinheit zu schaffen. Wir haben bereits in unseren einleitenden Betrachtungen gezeigt, welche Schwierigkeiten es bietet, die Größe des Meters festzulegen, in welchem alle Gesetze der Natur verkörpert sind, und dessen unveränderliche Kenntnis uns allein in den Stand setzt, einst über etwaige Veränderungen dieser Gesetze selbst in Jahrtausenden Aufschluß zu erhalten. Das Urmeter kann abhanden kommen, wie es bereits mit manchem Urmaß geschehen ist, und die Beziehung desselben zur Größe der Erde bietet gleichfalls keine genügende Sicherheit, wie man ehemals geglaubt hatte. Die schriftliche Überlieferung gibt größere Gewähr für die Dauer, wie die Geschichte beweist. Bei der Fürsorge, die man heute in dieser Hinsicht trifft, wird es wohl noch nach Jahrtausenden bekannt sein, daß die Wellenlänge des Lichtes der ersten Natriumlinie 589,61 Millionstel Millimeter oder 0,00000058961 von demjenigen Maß betrug, das man damals als 1 m kannte. Mit dieser Kenntnis allein kann man die Länge des Meters in jeder beliebigen anderen Einheit wiederherstellen. Man braucht hierfür nur den Ablenkungswinkel der Linie zu messen, die von einem Gitterspektrum ausgeht, von dem man weiß, wie viele seiner Linien auf jene andere Einheit gehen. Gesetzt den Fall, die Bestimmung der Wellenlänge in dem neuen Maß ergäbe dafür 0,000000595506 jener neuen Einheit. Dann gibt die Division dieser Zahl durch die überlieferte Wellenlänge in Metern das Verhältnis der beiden Maße zueinander an. Im gegebenen Fall verhält sich jenes angenommene Zukunftsmeter zu dem unsrigen wie 1 : 1,01. Die Messung mag in jedem Fall bis auf 0,01 Millionstel Millimeter für die Wellenlänge genau sein, was durchaus den Leistungen unserer modernen Beobachtungstechnik entspricht. Durch diese Methode kann die Länge unseres Meters bis auf eine Unsicherheit von 0,017 mm wiederhergestellt werden. Wesentlich genauer sind in Anbetracht der hinzutretenden

Unsicherheiten durch die Einwirkungen der Temperatur unsere direkten Maßvergleichungen mit den Komparatoren unserer Normaleichämter auch nicht, und es ist kaum zweifelhaft, daß man schon nach wenigen Jahrhunderten über den Betrag, um welchen sich bis dahin das augenblicklich in Paris auf das sorgfältigste aufbewahrte Urmeter verändert haben muß, unsicherer sein wird als über die Größe des mit Hilfe der Wellenlängen des Lichtes wiederhergestellten Meters.

Hierbei ist immer die stillschweigende Voraussetzung gemacht, daß diese Wellenlängen selbst etwas Unveränderliches sind. Wenn unser Eindringen in die Naturerscheinungen uns zwar mehr und mehr die Überzeugung aufnötigt, daß überhaupt nichts in der Welt unveränderlich ist, so müssen wir doch zweifellos vor allen anderen diesen molekularen Bewegungsverhältnissen des Äthers, der die Welträume rings erfüllt, eine Beständigkeit zuschreiben, die für menschliche Begriffe unerschütterlich ist. Freilich darf man sich auch in Bezug auf den absoluten Charakter des Wellenlängenmaßes nicht in völliger Sicherheit wiegen. In unserer, allen diesen Betrachtungen zu Grunde gelegten, Anschauung ist die letzte Ursache jener Bewegungen der Molekularsysteme, welche ihrerseits den Äther in die Wellenbewegung versetzen, die allgemeine Gravitation, wie die chemischen Erscheinungen noch klar legen werden. Die Gravitation ist bisher als die einzige Kraft erkannt, die in ihrer Wirkung von keiner anderen Naturkraft beeinflußt wird, und die unveränderlich zu sein scheint in allen Veränderungen der physikalischen Zustände der Umgebung. Dies muß der Fall sein, wenn die mittlere Geschwindigkeit jener freien Ätheratome, deren Stöße nach unserer Ansicht die Gravitation verursachen, in allen Teilen des Weltgebäudes, die wir durchwandern, dieselbe ist. Hierfür haben wir aber durchaus keine absolute Gewißheit, wiewohl es höchst wahrscheinlich ist, daß die Bewegungsverhältnisse oder die Dichtigkeit des Äthers bei seiner ganz freien Beweglichkeit im unermeßlichen Weltraume seit den unendlichen Zeiten, die ihm dafür zu Gebote standen, sich überall ausgeglichen haben. Aber hier gelangen wir bereits wieder an jene Grenzen einer menschlichen Unendlichkeit, die keine absolute ist, und über die hinaus unsere Betrachtungen jede sichere Basis verlieren. Wir müssen deshalb auch nach Mitteln und Wegen suchen, die mögliche Veränderlichkeit der Schwerkraft nachzuweisen. Solche Mittel bietet in erster Linie die astronomische Forschung. Sind unsere Anschauungen über die Entstehung der molekularen Bewegungen richtige, so müssen wir die Wellenlängen des Lichtes sich mit der allgemeinen Schwerkraft verändern sehen.

Nach diesem Abstecher zu der schwierigen, aber interessanten Frage nach der Festlegung sogenannter absoluter Maße kehren wir auf die Beugungserscheinungen des Lichtes zurück und haben noch auf den Unterschied der Lage der Linien eines Beugungs- und eines prismatischen Spektrums hinzuweisen, der auf der Verschiedenheit der hier wirkenden geometrischen Gesetze beruht. Aus unserer Formel $\lambda = b \sin \alpha$ (s. S. 273) geht unmittelbar hervor, daß beim Gitterspektrum die Abstände der Linien ihrer Wellenlänge proportional sein müssen. Dies ist nach den Gesetzen der Brechung in einem Prisma nicht der Fall. Wir haben auf der Tafel „Farbige Lichterscheinungen" bei Seite 270 in Fig. 3 zwei gleich lange Spektren der beiden Arten untereinandergestellt. In dem prismatischen Spektrum wird die eine Hälfte fast ganz von den blauen und violetten Strahlen ausgefüllt, während sich Grün, Gelb und Rot auf der anderen Seite zusammendrängen. In dem Gitterspektrum sehen wir die Farben viel gleichmäßiger verteilt. Die Mitte nimmt etwa die gelbe D-Linie ein; die roten Strahlen sind wesentlich mehr ausgebreitet als in dem prismatischen Spektrum. Dies bietet der Beobachtung große Vorteile gerade für diese weniger brechbaren Strahlen, die nicht wie die violette Seite des Spektrums den Vorzug besonderer photographischer Empfindlichkeit haben.

Dieselben Kreuzungen der Lichtwellen, welche ein solches Gitterspektrum bilden, rufen auch den Perlmutterglanz und das Schillern der Flügeldecken mancher Insekten hervor. Unter dem Mikroskop sind die schillernden Oberflächen mit einer sehr großen Zahl feiner glänzender Rippchen überzogen, die als Beugungsgitter wirken. Dieses Schillern ist also eine rein optische Erscheinung und hängt nicht, wie die Oberflächenfarben, mit den inneren molekularen Eigenschaften der betreffenden Substanz zusammen.

Legt man eine Konvexlinse auf eine ebene Glasscheibe, so erscheinen um die Berührungsstelle geordnete Ringe, die prismatische Farben zeigen. Diese sogenannten Newtonschen Farbenringe werden von den stehenden Lichtwellen hervorgerufen, die durch die Kreuzung zwischen der Linse und der Glasplatte zurückgeworfener Strahlen entstehen. Wir haben also auch hier eine Interferenzerscheinung vor uns. Den Abstand der beiden an diesem Spiel der Lichtwellen beteiligten Glasoberflächen kann man in verschiedenen Entfernungen von der Berührungsstelle berechnen, und die Größe der Ringe gibt in diesen Entfernungen ein Maß für die Wellenlängen selbst. Dünne Blättchen, wie z. B. die Wände einer Seifenblase (s. die Tafel „Farbige Lichterscheinungen" bei Seite 270, Fig. 4), zeigen auch solche Farbenerscheinungen, denn hier werden die Wellen von der Innen- und Außenwand des Blättchens oder Häutchens zurückgeworfen, so daß sich zwischen den beiden Wellensystemen stehende Wellen bilden. Da die Größe dieser Wellen die Farbe bedingt, die Dicke des Häutchens der Seifenblase sich aber beständig ändert, sind die Regenbogenfarben ihrer Oberfläche in schnellem Wechsel begriffen.

Diese Eigenschaft dünner Blättchen ist zu einem Verfahren zur Herstellung farbiger Photographien benutzt worden, das zuerst Lippmann in Paris ausführte, während lange Zeit vorher Zenker seine Ausführbarkeit theoretisch vorausgesagt hatte. Eine mit einer besonders feinen Schicht gewöhnlicher lichtempfindlicher Substanz versehene Glasplatte legt man auf eine Quecksilberschicht, so daß das die Platte durchdringende Licht von der spiegelnden Quecksilberoberfläche zurückgeworfen wird und mit den neu eindringenden Strahlen stehende Wellen innerhalb der empfindlichen Schicht bildet. Der Abstand der Lichtknotenpunkte hängt von der Farbe des eindringenden Lichtes ab. Ebenso wie wir gesehen haben, daß bei schwingenden Saiten die Knotenpunkte ruhen, während in der Mitte zwischen ihnen die lebhafteste Bewegung herrscht, wird man es verstehen, daß an diesen Lichtknotenpunkten keine oder doch nur eine geringe Zersetzung der lichtempfindlichen Substanz stattfindet, in den Gebieten zwischen den Knotenpunkten dagegen eine um so kräftigere. Der entstehende schwarze Silberniederschlag muß also sehr feine Schichtungen haben, die einander näher liegen, wo blaues Licht eingedrungen ist, dagegen weniger zahlreich sind, wo rotes Licht einwirkte. Eine solche Platte unterscheidet sich zunächst nicht von einem gewöhnlichen Negativ. Von einem Spiegel aber wird das wieder zwischen diesen Schichten zurückstrahlende Licht zur Bildung von stehenden Wellen von derselben Länge gezwungen, welche die Schichten erzeugt hatten; das so betrachtete Negativ zeigt deshalb die natürlichen Farben des aufgenommenen Gegenstandes. Wie interessant zwar diese Methode vom theoretischen Standpunkt ist, so unvollkommen sind doch noch deren praktische Resultate geblieben. Diese farbigen Bilder haben eine gewisse Ähnlichkeit mit den alten Daguerreotypien, die man wegen ihrer spiegelnden Fläche auch nur immer unter einem bestimmten Gesichtswinkel gut sieht. Es scheint nicht, daß auf diesem Wege die Zukunft der Farbenphotographie liegt, um so weniger, als er offenbar nicht derjenige ist, den die Natur zur Erzeugung der Farbeneindrücke in unserem Auge eingeschlagen hat. Das weiter oben geschilderte Dreifarbenverfahren kommt diesem letzteren Wege näher.

Auch für die Beugungserscheinungen läßt sich ein Vergleich mit den Schallwellen finden. E. Thomson hat darauf hingewiesen, daß eine plötzliche Erschütterung der Luft, die sich, z. B. durch einen Schuß entstanden, an einem Gitter, etwa an den einzäunenden Stäben einer langen Brücke, bricht, einen sehr hohen Ton durch die Kreuzungen der Schallwellen hervorruft. Ebenso, meint der englische Physiker, müßte ein plötzlicher Ätherstoß, an einem Gitter reflektiert, eine Lichterscheinung veranlassen.

Die Eigenschaft der Durchsichtigkeit verschiedener fester Stoffe, wie des Glases und der meisten Kristalle, beruht offenbar auf einer ganz bestimmten regelmäßigen Anordnung der Moleküle, die den Lichtwellen zwischen ihnen hindurchzugehen gestatten, während die Wellenbewegung bei den undurchsichtigen Körpern schon bei geringem Eindringen durch den Widerstand einer unregelmäßigen Lagerung dieser kleinsten Systeme völlig zerstört wird. Es bleibt nur die fortschreitende Bewegung der Ätheratome übrig, die, wie wir sehen werden, die Gravitationsarbeit verrichtet. Schon die äußere, so entzückend regelmäßige Form der Kristalle läßt kaum einen Zweifel darüber, daß auch ihr innerer Aufbau aus jenen Molekularsystemen den gleichen geometrischen Gesetzen folgen muß, die ihre äußere Form ausdrückt. Wir dürfen also von vornherein vermuten, daß zu diesen geometrischen Baugesetzen auch alle physikalischen, somit auch die optischen Eigenschaften, Beziehungen haben werden. Dies bestätigt nun die Beobachtung in überraschender Weise.

Die Formen der Kristalle, in denen die Natur ihre Materie ordnet, wenn sie sie aus ihrem beweglichen Zustande zu beständigeren Systemen zusammenfügt, sind von ungemein mannigfaltiger Art. Wir wollen erst einen eingehenderen Überblick dieser Formen geben, sobald wir uns in unserem chemischen Kapitel mit den jedem Stoffe speziell zukommenden Eigenschaften beschäftigen, zu denen eben auch die Bildung der Kristallform gehört. Man unterscheidet Kristalle des regulären Systems von denen des nichtregulären. Zu den ersteren gehören die Kristalle mit senkrecht zueinander stehenden Achsen, wie wir sie bei den Würfeln des Steinsalzes finden. Zu den nichtregulären gehört der isländische Kalkspat, dessen Kristallachsen schiefe Winkel bilden. Alle Kristalle, auch in ihren verwickeltsten Gestalten, sind so gebaut, daß verkleinerte Wiederholungen entweder ihrer Form selbst oder einer einfacheren Grundform aneinandergelegt ihre Gestalt im großen wiedergeben. Man kann, um ein einfaches Beispiel anzuführen, aus einer Anzahl kleinerer Würfel immer einen größeren zusammensetzen. Wir teilen zwar heute nicht mehr die ältere Anschauung, wonach wir den allerkleinsten Elementen der Materie diese Grundformen geben müßten, die sich dann zu größeren Kristallen einfach zusammenlegen, denn wir wissen, daß die kleinsten Teile, die Atome in den Molekülen und diese selbst, in beständiger Bewegung sind und dazu große Zwischenräume brauchen. Aber wir dürfen doch annehmen, daß jene molekularen Weltsysteme, deren vielfache Bewegungen wir immer genauer zu erkennen streben, sich in einer noch nicht näher bekannten Weise so gegenseitig beeinflussen, daß sie sich scheinbar zu solchen festen Grundformen vereinigen. Wir haben hier nur Vermutungen. Wollen wir aber auch hier unsern Vergleich aus dem großen Weltgebäude nehmen, so stellen wir uns vor, daß eine Vereinigung von kugelförmigen Systemen mit überall gleichen Größen- und Bewegungsverhältnissen in ihren kristallinischen Eigenschaften als würfelförmig bezeichnet werden muß, weil zwischen den Berührungspunkten der kugelförmigen Wirkungssphären der benachbarten Systeme sich jedesmal ein Würfel konstruieren läßt (s. die Abbildung, S. 277). Da wir den Zusammenhang der einzelnen Körper innerhalb eines Moleküls viel größer annehmen müssen, als den der gruppierten Moleküle untereinander,

so ist klar, daß längs jener zwischen den Berührungspunkten der molekularen Sphären gedachten Flächen, die sich zu jenen Würfeln zusammensetzen, die kleinsten Teile des Stoffes leichter voneinander zu trennen sind als in irgend einer anderen Richtung, weil die Schnittfläche nur in dieser Richtung niemals die Wirkungssphäre eines Moleküls zu durchdringen braucht. Ein Kristall ist also, wenn unsere Anschauung richtig ist, im allgemeinen in der Richtung seiner Flächen am leichtesten spaltbar, eine Eigenschaft, die in der Tat nur für diese Körper charakteristisch ist. Was aber für diese grob mechanische Wirkung des Spaltens gilt, hat auch für jede andere physikalische Wirkung prinzipiell Geltung, denn ganz allgemein müssen in diesen Flächen die Kristalle den kleinsten Widerstand zeigen. Nach diesen Gesichtspunkten haben wir die optischen Eigenschaften der Kristalle zu prüfen.

Es ist klar, daß sich die molekularen Weltsysteme nicht auf kugelförmige Wirkungssphären beschränken werden. In demselben Sinne betrachtet entspräche z. B. unser Planetensystem mit seinen in nur einem kleinen Winkel um eine Hauptebene gruppierten Bahnen einem flachen, mehrachsigen Kristallkörper. Alle anderen Kristallformen würden ebenfalls aus einer Verbindung von kreisförmigen oder elliptischen Bahnen um einen gemeinschaftlichen Schwerpunkt erzeugt werden können.



Würfelkonstruktion aus Kugeln. Vgl. Text, S. 276.

Was wird nun geschehen, wenn auf eine Gruppierung derart geordneter Molekularsysteme die Wellenzüge eines Lichtstrahls treffen? Dringt der Strahl in der Richtung der Kristallflächen ein, so wird er offenbar am wenigsten am Durchgang gehindert, weil er auf diesem Weg den geringsten Widerstand findet. Wo dabei ein Strahl auf einen der umschwingenden Teile eines Moleküls trifft, wird seine Bewegung beeinflußt, d. h. seine Temperatur wird verändert und geht dafür als Licht verloren. Denn kein Körper ist in der Tat vollkommen durchsichtig. Fällt der Strahl aber geneigt zu den Spaltflächen eines Kristalles, so dringt er um so mehr in die Wirkungssphären der Moleküle ein, je schräger er fällt; der Kristall wird für den Strahl rauher. Es entwickeln sich daraus mit mathematischer Konsequenz die Brechungserscheinungen bis in alle ihre Einzelheiten, wie wir sie im Vorangegangenen dargestellt haben. Daß die meisten Flüssigkeiten und Glas dieselben optischen Eigenschaften wie jene regulären Kristalle haben, erklärt sich leicht, wenn wir auch diese Stoffe aus kugelförmigen Molekülen in gleichen Abständen zusammengesetzt denken. Bei den Flüssigkeiten braucht diese Kugelform der Moleküle nur eine scheinbare zu sein, weil sie sich nach allen Seiten hin bewegen und somit durch ihre eigene Drehung eine kugelförmige Wirkungssphäre erhalten.

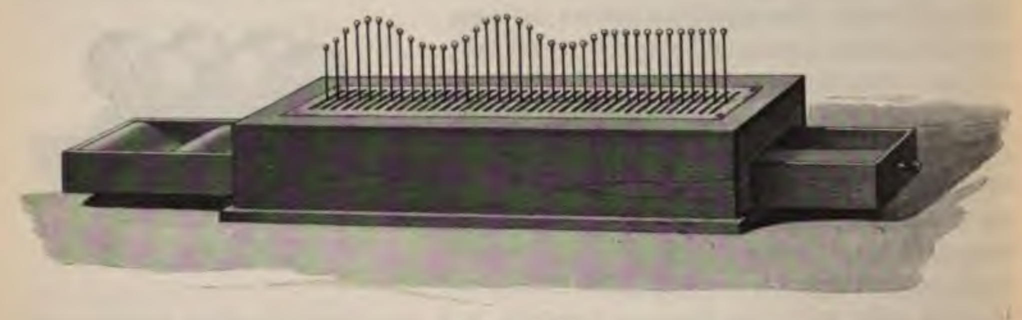
l) Polarisation des Lichtes.

Aber die geschilderte Gruppierung der Stoffelemente in den Kristallen führt nun noch zu einer Reihe von sehr merkwürdigen Erscheinungen, die wir als Polarisation des Lichtes bezeichnen, und die gerade über die besondere Natur des molekularen Aufbaues der Kristalle die wichtigsten Aufschlüsse gegeben haben. Um diese Erscheinungen in ihrem Wesen auffassen zu können, wollen wir uns noch etwas eingehender mit den Bewegungsvorgängen befassen, die wir als Lichtwellen erkannt haben.

Wir haben schon wiederholt darauf hingewiesen, daß die Wellenbewegungen des Lichtes, die wir zwar durch den Vergleich mit den Schwingungen einer Saite verstehen lernten, doch

wesentlich verwickelter als diese sein müssen. Die Bewegungen einer Saite gehen in einer Ebene vor sich, die des Lichtes im Raume. Aus der Wellenlinie wird deshalb eine Schraubenlinie. Die Dicke dieser „Lichtschraube" gab die Lichtstärke, die Wellenhöhe; der Abstand der einzelnen Schraubenwindungen gab die Wellenlänge an, wodurch die Farbe des Strahles bedingt ist. Es kommt uns darauf an, die besonderen Bewegungsverhältnisse in einer solchen Schraubenlinie noch näher kennen zu lernen.

Zu dem Zweck bedienen wir uns einer **Wellenmaschine** von etwas vollkommenerer Art, als der auf Seite 95 beschriebenen. Wir lassen die Stiftchen mit den Knöpfen sich nicht nur auf und ab, sondern auch seitlich bewegen und stellen deshalb jeden Stift in einen Schlitz, wie aus der untenstehenden Zeichnung ersichtlich ist. Die Auf- und Abbewegung wird durch eine Wellenfläche besorgt, die man unter den Stiften vorbeiziehen kann. Über jener Wellenfläche bringen wir noch eine Schlitzvorrichtung an, die eine horizontale Wellenlinie darstellt (s. die Abbildungen, S. 279). Die Stiftchen werden so beim Vorüberziehen der Wellenfläche gezwungen,



Wellenmaschine.

mit den auf- und abgehenden Wellen zugleich sich seitlich zu bewegen. Beide vereinten Bewegungen der Stiftchenreihe machen dann völlig den Eindruck einer Bewegung in einer Schraubenlinie und entsprechen tatsächlich einer solchen, abgesehen von der fortschreitenden Bewegung, die wir ja auch bei unseren Betrachtungen über die Lichtwellen in Abzug zu bringen haben. Eine solche Bewegung auf einer Schraubenlinie können wir in zwei aufeinander senkrecht stehende Wellenbewegungen zerlegen, von denen jede nur in einer Ebene, nicht mehr im Raume, stattfindet. Wir müssen uns dabei aber von vonherein darüber klar bleiben, daß es nur ein **Notbehelf** ist, durch den wir unsere Betrachtungen auf die Ebene zurückführen, weil wir uns in dieser leichter zurechtfinden als im Raume. Die Lichtbewegung des Äthers setzt sich nicht wirklich aus zwei solchen Teilen zusammen, sondern die Zerlegung der Schraubenbewegung in zwei ebene aufeinander senkrechte Wellen soll die Lichtbewegung des Äthers nur veranschaulichen, wie wir im Kapitel der Mechanik eine in der Natur einheitliche Kraft nach dem Gesetz vom Parallelogramm der Kräfte in zwei oder mehr Komponenten zerlegen lernten.

Unsere Wellenmaschine erlaubt uns nun die verschiedensten Kombinationen dieser beiden angenommenen Wellenbewegungen in zwei Ebenen auszuführen. Machen wir die Wellenhöhen in den beiden Ebenen gleich groß, so bewegt sich jedes einzelne Stiftchen in einem Kreise, und wenn die Wellenhöhen verschieden sind, in einer Ellipse; machen wir eine der Wellenhöhen gleich Null, so bewegen sich die Stiftchen entweder nur auf und ab oder hin und her. Nach unserer Anschauung über den Aufbau der molekularen Welten spiegeln die entsprechenden

Bewegungen der Ätherteilchen die Umlaufsbewegungen der Atome in den Molekülen wider, die nach unseren Erfahrungen im Weltgebäude entweder in kreisförmigen oder elliptischen Bahnen laufen müssen. Unsere im Geiste vorgenommene Zerlegung dieser Bewegungen in zwei Komponenten vereinfacht wesentlich unsere Betrachtungen, wie sich ein solcher körperlicher Lichtstrahl bei seinem Eindringen in kristallinisch geschichtete Körper verhalten muß.



Vertikaler Teil der Wellenmaschine. Vgl. Text, S. 278.

Um den verschiedenen Widerstand anschaulich zu machen, den die beiden oben definierten Komponenten der Lichtschwingungen in einem Kristall finden, dessen molekulare Elemente in rechtwinkelig senkrechten Reihen würfelbildend geordnet sind, versuchen wir es, eine ebene Fläche, etwa einen Streifen von Kartonpapier, zwischen diese Reihen zu schieben. Dieser Streifen, parallel zu einer Kante des Würfels und senkrecht zu einer Fläche des letzteren angesetzt, schiebt sich leicht zwischen eine der Reihen ein (s. in der Abbildung, S. 280 oben, den Streifen A). Das Gleiche gelingt mit einem Streifen B, der senkrecht zu dem ersten steht, denn er ist dann parallel mit einer anderen Fläche des Würfels. Es geht hieraus hervor, daß ein senkrecht auf eine Fläche eines würfelförmigen Kristalles fallender Lichtstrahl keinen wesentlichen Widerstand und keine Veränderung erleidet. Nun aber wird der Strahl geneigt. Dann muß der schräg eindringende Streifen C die molekularen Systeme, die wir für diesen Fall als feste Körper ansehen, durchschneiden und findet deshalb einen seiner Neigung entsprechenden Widerstand. Bei einem schräg auffallenden Strahl werden seine beiden Komponenten in verschiedener Weise beeinflußt und müssen also auch entsprechend verschiedene Eigenschaften zeigen. Die zur Einfallsfläche senkrechte Komponente der Lichtschwingungen dringt in den Kristall ein und erleidet nur infolge des Widerstandes, den die Schwingungen hier beim Eintritt zwischen die Wirkungssphären der Moleküle finden, die Brechung, deren Eigenschaften wir kennen. Die Ätherteilchen aber, welche mit einer Bewegungskomponente den Kristall erreichen, die in



Horizontaler Teil der Wellenmaschine. Vgl. Text, S. 278.

der Einfallsebene von C liegt, haben viel mehr Gelegenheit, beim Hin- und Herschwingen in dieser Richtung mit den Molekülen des Kristalles zusammenzutreffen und werden von diesen zurückgeworfen nach den Gesetzen, die wir für den schrägen Stoß kennen gelernt haben, und die mit den Gesetzen der Lichtreflexion übereinstimmen. Damit ist die molekulare Ursache der Teilung des schräg auffallenden Strahles in einen gebrochenen und einen reflektierten gegeben und zugleich theoretisch nachgewiesen, daß die Lichtwellen des reflektierten Strahles eine ganz besondere Eigenschaft haben müssen. Seine Schwingungen können nicht mehr in einer Schraubenlinie vor sich gehen wie die des sogenannten natürlichen Lichtes, sondern finden nur in einer bestimmten Ebene C (s. die mittlere Abbildung, S. 280) statt, die parallel zu der

Einfallsebene E des reflektierenden Körpers liegt. Man sagt, der Strahl a b ist polarisiert (ein recht ungeschickter Ausdruck, der sich aber so sehr eingebürgert hat, daß er wohl kaum noch durch einen besseren ersetzt werden dürfte). Die Ebene C, in welcher sich der polarisierte Strahl bewegt, und zu der die Schwingungen senkrecht stehen, heißt die Polarisationsebene.

Schema der Kristallschichten eines würfelförmigen Kristalls gegen verschieden einfallende Lichtstrahlen. Vgl. Text S. 279.

Ohne weiteres unterscheidet sich nun ein polarisierter Strahl von einem anderen in keiner Weise. Um aber seine Eigenschaften unter besonderen Bedingungen zu untersuchen, wird es erwünscht sein, daß wir aus unseren vorangegangenen theoretischen Betrachtungen folgern, unter welchen Bedingungen das Maximum der Polarisation stattfinden muß, bei welchem also der Strahl nicht nur in die Einfallsfläche eindringt. Wir haben schon ersehen, daß dieselbe mit der Neigung des Strahles [illegible]. Dagegen findet bei 90° Einfallswinkel offenbar wieder keine Polarisation statt; denn [illegible] streifen die zur Einfallsfläche parallelen Schwingungen diese nur noch, oder wenn sie in den Kristall eindringen, so geschieht dies senkrecht zu einer der Seitenflächen des Würfels. [illegible] bei 0° sowohl wie bei 90° Einfallswinkel keine Polarisation stattfindet, sollte man vermuten, daß das Maximum bei 45° liegen müsse. [illegible] nauere Betrachtung dieser Bewegungsverhältnisse, [illegible] die wir nicht näher eingehen können, ergibt [illegible] dies nicht ganz richtig ist, sondern daß die [illegible] in die beiden Bewegungskomponenten erst [illegible] jenigen Richtung an gemessen werden darf, [illegible] bereits gebrochene Strahl einnimmt. Das [illegible] der Polarisation eines Strahles (a b in der [illegible]



Lichtschwingungen in der Polarisationsebene.

Figur) findet in einer Richtung (b c) statt, die senkrecht auf dem gebrochenen Strahle [illegible] steht. Für Glas ist dies bei einem Einfallswinkel von 56° der Fall. Der auf der [illegible] Seite im gleichen Winkel zurückgeworfene Strahl schließt in diesem Falle mit dem im [illegible] weitergehenden gebrochenen Strahl einen rechten Winkel ein, oder der letztere macht [illegible] verlängerten Einfallslot einen Winkel von 90—56 [illegible]

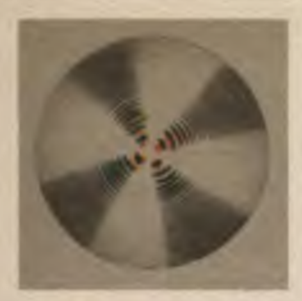


Polarisationswinkel.

Zur Prüfung eines solchen polarisierten Strahles [illegible] die Schwingungsrichtung seiner Lichtwellen mag es uns [illegible] lich erscheinen, ihn durch Kristalle zu beobachten, deren [illegible] einen passenden Aufbau der Moleküle verrät. Dabei [illegible] es sich, daß der Turmalin, der langgestreckte [illegible] Säulen bildet, eine sehr merkwürdige Wirkung auf den polarisierten Strahl ausübt. Eine aus einem Turmalinkristall geschnittene dünne Platte, deren Oberfläche parallel zu der [illegible] metrischen, in der Länge durch den Säulenkörper gehenden Hauptachse des Kristalles liegt, läßt wohl gewöhnliches Licht unverändert hindurch, nicht aber unter jeder Bedingung polarisiertes Licht. Lassen wir auf [illegible] Platte einen Strahl fallen, der von ihr polarisiert reflektiert wird, so findet keine Veränderung



1. Kalkspat, schwarzes Kreuz.



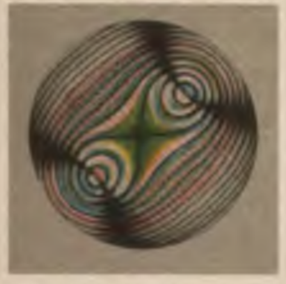
2. Kalkspat, weißes Kreuz.



3. Zwei Platten parallel zur Achse gekreuzt, Hyperbeln.



4. Kalisalpeter, schwarzes Kreuz.



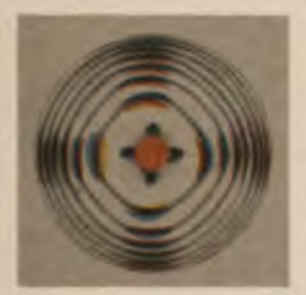
5. Kalisalpeter, Hyperbeln.



6. Zucker, unecht kreisförmige Ringe.



7. Quarz, Kreisringe.



8. Quarz, quadratische Ringe.



9. Quarz, quadratische Spiralen.



10. Aragonite, gekreuzt. Natriumlicht.



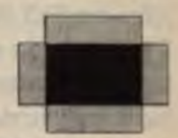
11. Quarz, Airysche Spiralen.



12. Aragonite, gekreuzt. Natriumlicht.

Chromatische Polarisation.

statt, wenn die Achsenrichtung des Kristalles parallel zur Richtung der Einfallsebene dieses Strahles, also senkrecht zur Polarisationsebene steht; das von ihr durchgelassene Licht wird aber in demselben Maße geringer, als die Richtung der Hauptachse des Kristalles gegen die Richtung der Polarisationsebene hingedreht wird. Hat die Achse diese Richtung angenommen, so läßt die Platte so gut wie gar kein Licht mehr durch. Es erscheint dies durchaus wunderbar, da die Platte doch sonst in jeder Lage durchsichtig bleibt und der reflektierte Strahl für unser Auge Licht wie anderes Licht zu sein scheint. Es ist uns ohne weiteres gar nicht erklärlich, wie die bloße Drehung einer glasartigen Platte in ihrer Fläche, wodurch doch der Weg des Lichtes durch diese Platte nicht verändert wird, sie in verschiedenem Grade durchsichtig machen soll. Die Erscheinung erklärt sich uns aber sofort unter der Annahme, daß die Moleküle des Turmalins sich so aufbauen, daß sie für das Licht gewissermaßen ein Gitter bilden. Wir können uns etwa vorstellen, im Inneren des Kristalles lägen kleinere gleichgeformte Kristalle mit ihren Kanten der Länge nach nebeneinander. Durch dieses Gitter gehen dann nur Strahlen, deren Wellenebene in der Richtung der Gitterstreifen liegt; querschwingende Wellen dagegen finden an den Gitterstangen, an denen sie hin und her streifen müssen, zuviel Widerstand. Der Turmalin läßt deshalb nur solches polarisiertes Licht durch, dessen Schwingungsebene mit der Richtung seiner Hauptkristallachse parallel liegt, bleibt dagegen durchsichtig für Licht, das in allen Ebenen schwingt.


Polarisation des Lichtes in gekreuzten Turmalinen.

Ist diese Erklärung richtig, so müssen wir durch eine Turmalinplatte allein schon polarisiertes Licht erhalten, weil durch seine Gitter nur die in dieser Richtung liegenden Wellen hindurchgehen können. In der Tat, lassen wir einen gewöhnlichen Strahl durch eine Turmalinplatte fallen, so löscht ihn eine zweite Turmalinplatte aus, wenn die Achsen der beiden Platten gekreuzt sind (s. die oben- und untenstehende Abbildung), läßt ihn dagegen ungehindert durch bei paralleler Achsenstellung.

Bei der optischen Prüfung anderer Kristalle fällt sofort der sogenannte isländische Kalkspat auf, ein recht selten gewordenes Mineral, das außer in einer seinetwegen berühmt gewordenen Grotte auf Island nur noch an wenigen Orten der Erde in genügend großen und reinen Kristallen vorkommt. Diese haben eine Form, die man stereometrisch mit Rhomboeder bezeichnet. In der Natur freilich kommt der Kalkspat selten in dieser vollkommen durchsichtigen Form vor. Aber aus den unregelmäßig gewachsenen Kristallen kann man durch Spaltung ihre regelmäßige Form erhalten, denn diese Spaltung geschieht immer in denjenigen Flächen am leichtesten, nach welchen sich im Inneren die materiellen Elemente jener Grundform entsprechend zusammengelegt haben. Die sechs Seiten eines solchen Kalkspat-Rhomboeders haben nun überall schiefe Winkel. In zwei seiner acht Ecken stoßen je drei stumpfe Winkel zusammen, deren jeder 101° 53′ mißt; die übrigen Ecken haben je einen stumpfen und zwei spitze Winkel. Der Rhomboeder stellt sich danach gewissermaßen als ein nach jeder Richtung hin verschobener Würfel dar.


Strahlengang durch gekreuzte Turmaline.

Dem entsprechend verschieben sich nun auch die Lichtstrahlen in seinem Inneren, aber die Wirkung ist doch auf den ersten Blick überraschend. Legt man einen solchen Kristall z. B. auf

die Zeichnung einer Figur, so zeigt sich dieselbe verdoppelt, wie es unsere untenstehende Abbildung veranschaulicht. Durch keine Drehung des Kristalles auf der Zeichenfläche können die beiden Bilder zur Deckung gebracht werden; das eine Bild dreht sich dabei um das andere, welches seinerseits an seinem Orte bleibt. Es ergibt sich demnach, daß ein auf die eine Fläche des Kristalles fallender Strahl ab sich in zwei Strahlen bc und bd spaltet, von denen der eine bc in gewöhnlicher Weise gebrochen wird, wie es bei den regulären Kristallen und bei Glas der Fall ist; man nennt deshalb diesen Strahl den **ordentlichen**, während ein anderer Strahl bd, der **außerordentliche**, um einen ganz bestimmten Winkel abgelenkt wird, so daß er parallel zu einer Fläche des Kalkspates verläuft (s. die obere Abbildung, S. 283). In dieser Lage bleibt er, wie man auch den Kristall dreht. Kippt man dagegen den Kristall, so nähern oder entfernen sich die beiden Strahlen voneinander, fallen aber zusammen, wenn der einfallende Strahl mit jener Fläche parallel ist, der der außerordentliche Strahl folgt.

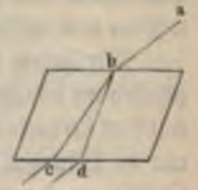
Die seltsame Erscheinung erklärt sich sofort, wenn wir unsere Anschauung über den Aufbau der Kristalle zu Hilfe nehmen. Wir denken uns den Kalkspat zusammengesetzt aus molekularen Systemen von sphäroidaler Form, wie es etwa unser Sonnensystem sein würde, nur müssen wir uns die Bahnen der Planetenatome noch langgestreckter vorstellen. Gruppieren wir solche Systeme mit möglichster Raumersparnis nebeneinander, so kommen sie nicht senkrecht, sondern seitlich verschoben nebeneinander zu liegen, und die Flächen, welche wir mit geringstem Widerstande zwischen die Wirkungssphären einer solchen Gruppierung schieben können, werden nun nicht mehr, wie beim Würfel und den anderen regulären Kristallfiguren, senkrecht aufeinander stehen, sondern sie werden verschiedene Winkel miteinander bilden, die eben diese besondere Kristallform bedingen. Unter diesen Winkeln muß immer ein spitzer sein, an dem sich ein eindringender Lichtstrahl spaltet, indem seine beiden Teile längs den beiden Flächen mit geringstem Widerstande weitergehen. Bei dieser Spaltung findet aber offenbar ebenso eine Zerlegung der ursprünglich schraubenförmigen Bewegung der Lichtwellen in Wellenflächen statt, wie bei der Brechung und Reflexion: Der außerordentliche Strahl drängt sich durch eine schräge Fläche, und seine Schwingungen finden deshalb nur in dieser statt, ebenso ist der andere, der ordentliche Strahl polarisiert, und beider Schwingungsebenen stehen aufeinander senkrecht. Die Untersuchung, für welche wir wieder unsere Turmalinplatte anwenden, bestätigt dies.



Doppelbrechung des isländischen Kalkspats. Nach „Das Buch der Erfindungen".

Die geschilderte Eigenschaft des Kalkspates dient nun vorzüglich dazu, polarisiertes Licht zu erzeugen. Man kittet zu dem Zweck zwei in bestimmten Winkelverhältnissen aus Kalkspat-Rhomboedern geschnittene Prismen mit Kanadabalsam aneinander. In der unteren Zeichnung, S. 283, befindet sich diese Grenzfläche bei HH. Der einfallende Strahl ab wird nun bei b in den ordentlichen Strahl bc und den außerordentlichen Strahl be geteilt. Ersterer wird aber an jener Grenzfläche bei c derartig reflektiert, daß er das erste Prisma wieder seitlich verläßt, ohne überhaupt in das zweite zu gelangen; nur der außerordentliche Strahl dringt in das zweite Prisma ein und tritt aus seiner Basisfläche zum weiteren Gebrauch aus. Eine solche Kombination nennt man ein **Nicolsches Prisma**. Man pflegt zwei solcher Prismen zu einem

sogenannten **Polarisationsapparat** zu vereinigen. Durch den einen „Nicol", den Polarisator, P in unserer Abbildung, S. 284, wird zunächst ein gewöhnlicher Strahl geschickt, der dadurch polarisiert wird; zwischen ihn und den anderen Nicol, den Analysator A schiebt man die Substanz bei S, die man auf ihre optischen Eigenschaften untersuchen will. Der Polarisator steht fest, der Analysator dagegen ist um seine Längsachse drehbar.



Ordentlicher und außerordentlicher Strahl im Kalkspat. Vgl. Text, S. 282.

Nach dem Vorausgegangenen sehen wir unmittelbar ein, daß der vom Polarisator herkommende Strahl auch den Analysator ungehindert passieren wird, wenn die Kristallachsen und mit ihnen jene das polarisierte Licht durchlassenden Flächen der beiden Nicols zueinander parallel stehen. Dreht man aber den Analysator um 90°, so kreuzen sich die Polarisationsebenen, und kein Licht dringt mehr durch. An diesem Sachverhalte wird begreiflicherweise nichts geändert, wenn wir zwischen die beiden Nicols eine planparallele Glasplatte legen, die überall gleiches Brechungsvermögen hat, also **homogen** ist, denn sie läßt ja Licht jeder Art ungehindert und auch ungebrochen durch. Anders werden dagegen die Verhältnisse, wenn wir die Glasplatte, etwa zwischen Schrauben (s. die obere Abbildung, S. 285), zusammenpressen. Dann müssen die kleinsten Teile des Glases in bestimmter, durch die Angriffspunkte der Pressung gegebener Weise zusammenrücken; die Masse des Glases wird an gewissen Stellen dichter als an anderen, und sein Brechungsvermögen wird dadurch zugleich geändert; das Glas ist dann nicht mehr homogen. Für das bloße Auge wird dadurch, wenn die Pressung nicht eine sehr große ist, nichts geändert, wohl aber im Polarisationsapparat. Das ihn durchdringende polarisierte Licht wird zugleich gebrochen. Dadurch entstehen, durch den Analysator gesehen, Farbenerscheinungen, die sich entsprechend der wechselnden Dichtigkeit der Platte gruppieren, so wie es etwa auf unserer Tafel „Farbige Lichterscheinungen" bei Seite 270, in Fig. 5 wiedergegeben ist. Dreht man den Analysator, so verändern sich diese Farben und gehen bei einer um 90° verschobenen Stellung in ihre komplementären Farben über. Das **gebrochene** Licht verschwindet also nicht gänzlich durch die Polarisierung. Auch diese Wahrnehmung läßt sich aus unseren Grundanschauungen geometrisch als notwendig nachweisen. Wir sehen, daß wir in der Untersuchung im polarisierten Lichte ein vorzügliches Mittel haben, die optische Gleichmäßigkeit von Glassorten nachzuweisen, die ja eine erste Bedingung für die Herstellung möglichst tadelloser optischer Instrumente aller Art ist.

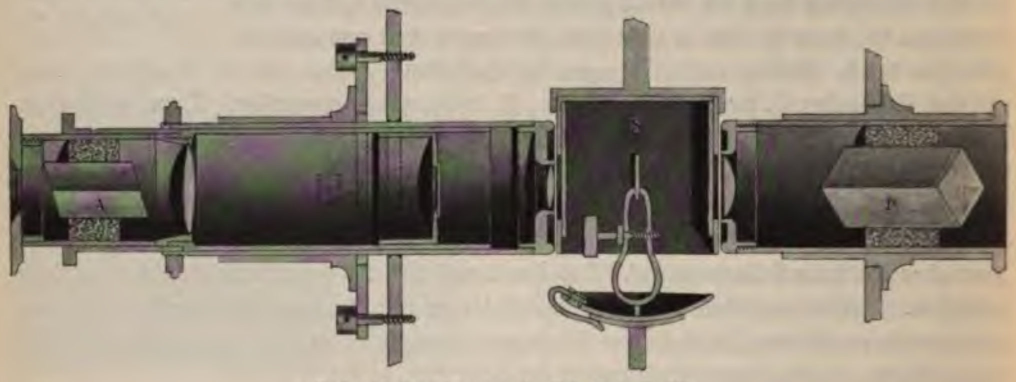


Nicolsches Prisma. Vgl. Text, S. 282.

Die Spaltbarkeit in Übereinstimmung mit den beschriebenen optischen Eigenschaften hat für die Kristalle bewiesen, daß in ihrem Inneren der Widerstand gegen alle Arten von Bewegungen in geometrisch gesetzmäßiger Weise wechselt. Dies äußert sich deshalb auch in dem Brechungsvermögen der einzelnen Partien. Die Dichtigkeit ihrer einzelnen Teile wird in regelmäßiger Weise verschieden sein, und wir nehmen deshalb bei ihnen im Polarisationsapparat bei konvergentem Licht ähnliche Farbenerscheinungen wahr wie in dem gepreßten Glase. Bei einer aus einem Kalkspatkristall senkrecht zur Achse herausgeschnittenen Platte, die wir zwischen unsere gekreuzten Nicols legen, zeigt sich bei entsprechender Anordnung der durchfallenden Strahlen eine prachtvolle Farbenerscheinung, die wir auf unserer bei S. 280 beigehefteten farbigen Tafel „Chromatische Polarisation" mit den entsprechenden Bildern für andere Kristallarten dargestellt haben. Es treten Farbenringe, den Newtonschen

ähnlich, auf, die von einem dunkeln Kreuz unterbrochen sind. Bei der Drehung des Analysators wechseln die Farben, und die hellen Partien gehen in dunkle über. Bei sogenannten einachsigen Kristallen haben diese Figuren nur einen Mittelpunkt, bei zweiachsigen zwei. Überhaupt lassen sich aus der Form dieser Bilder auf rein mathematischem Wege die Gruppierungen der materiellen Elemente in den Kristallen auf das schärfste bestimmen. Die Polarisationserscheinungen gewähren uns deshalb einen tiefen Blick in den Bau dieser Weltsysteme kleinster Dimensionen.

Wir haben früher (S. 277) gesagt, daß Glas und die Flüssigkeiten die optischen Eigenschaften der regulären Kristalle teilen, d. h. unter anderem keine Doppelbrechung wie der isländische Kalkspat hervorbringen. Nun haben wir für die Flüssigkeiten die Einschränkung zu machen, daß nur die Lösungen unorganischer Substanzen sich optisch so einfach verhalten. Viele organischen Substanzen, deren molekularer Aufbau wesentlich verwickelter ist als der der unbelebten Stoffe, zeigen die merkwürdige Eigenschaft, die Polarisationsebene zu drehen, so z. B. die Zuckerlösungen.



Polarisationsapparat. Vgl. Text, S. 283.

Sie drehen einen durchdringenden polarisierten Lichtstrahl um so mehr aus seiner ursprünglichen Ebene, je konzentrierter sie sind. Man kann deshalb den Polarisationsapparat zur Bestimmung des Zuckergehalts einer Lösung anwenden, und nennt einen hierfür besonders konstruierten Apparat einen Saccharimeter (s. die untere Abbildung, S. 285.) Die Drehung seines Analysators r gibt auf einer am Apparat angebrachten Skala e unmittelbar an, wieviel Prozent die untersuchte Lösung hat.

Daß schon die Bausteine, mit denen die wunderbar organisierten Maschinen der lebendigen Natur errichtet werden, ihre ganz besonderen Eigenschaften vor den trägen Stoffen der unorganischen Welt haben, zeigen auch insbesondere die optischen Erscheinungen des Chlorophylls, der geheimnisvollsten und wichtigsten aller organischen Verbindungen, die bekanntlich das Blattgrün hervorbringt und allein bei Gegenwart von Licht im stande ist, aus der von den Tieren ausgeatmeten Kohlensäure den Sauerstoff wieder frei zu machen, wodurch der Kreislauf des organischen Werdens und die dauernde Lebensfähigkeit der lebendigen Welt allein möglich wird. Kein anderer chemischer Prozeß kann diese Scheidung des verbrauchten Sauerstoffes von der bei der vollbrachten Arbeitsleistung verbrannten Kohle ausführen, und auch dieses Chlorophyll vermag dies nur unter jenem unbekannten Einflusse des Lichtes, dessen Wellen in sein chemisches Gefüge zersetzend eingreifen, wie beim photographischen Prozesse in die Schicht des Silbersalzes. Im chemischen Kapitel wird von diesem eigenartigen, für die Lebewesen unentbehrlichen Stoffe noch weiter die Rede sein.

m) Fluoreszenz, Phosphoreszenz, chemische Wirkungen des Lichtes.

Eine Chlorophylllösung erscheint für gewöhnlich grün. Läßt man aber einen weißen Lichtstrahl durch dieselbe gehen, so erscheint der von der Seite gesehene Strahlenweg in der Lösung rot, also komplementär zu der gewöhnlichen Farbe; tritt dagegen jener Strahl direkt nach Durchdringung der Lösung in unser Auge, so ist auch er grün. Während andere grüne Lösungen die Wellen aller anderen Farben des weißen Lichtes verschlucken, indem sie die diesen innewohnende Bewegungsenergie zu anderen, unsichtbaren molekularen Bewegungen, insbesondere zur Vermehrung ihrer Wärme anwenden, setzt das Chlorophyll diese absorbierten Strahlen wieder in Licht um, so daß jedes einzelne seiner Moleküle gewissermaßen selbstleuchtend wird und dieses komplementäre Licht nach allen Seiten hin aussendet. Die innermolekularen Vorgänge, welche die sogenannte Fluoreszenzerscheinung hervorrufen, sind noch unaufgeklärt, wie wir denn überhaupt noch einmal in Erinnerung bringen müssen, daß alle unsere hier verfolgten Anschauungen über die wahren Bewegungen jener molekularen Weltsysteme nur Hypothesen sind, die sich durch Analogieschlüsse und die zutreffende aus ihnen gezogene Ableitung von neuen Erscheinungsformen mehr und mehr befestigen. Für die Fluoreszenz können wir nun annehmen, daß sich unter den molekularen Bewegungen in dem betreffenden Atomsystem solche befinden, die bereits durch einen geringen Zuwachs von Energie sich in sichtbare Schwingungen verwandeln. Solche Flüssigkeiten oder festen Stoffe haben ein bandenförmiges Absorptionsspektrum; es finden also in ihnen bereits Schwingungen in den verschiedensten Wellenlängen statt. Wir haben nun früher gesehen, daß das Spektrum eines festen Körpers, der nach und nach erwärmt wird, von dem roten Ende langsam nach dem violetten hin fortschreitet. Durch die Erwärmung eines Körpers infolge der Absorption von Licht muß prinzipiell Ähnliches geschehen, nur sind die hier in Betracht kommenden Energiemengen so gering, daß praktisch davon nichts zu bemerken ist.



Zusammengepreßte Glasplatte. Vgl. Text, S. 283.

Noch bei einer ganzen Reihe von organischen, aber auch bei unorganischen Stoffen beobachtet man Fluoreszenz. So hat die Erscheinung ihren Namen vom Flußspat (Fluor), der bei durchfallendem Lichte hellgrün ist, während das aus seinem Inneren allseitig infolge jener Umwandlung ausstrahlende Licht dunkelblau ist. Das gelbe Petroleum fluoresziert blau, das gelbe Uran, einem Glasfluß hinzugefügt, zeigt ein schön grünes Fluoreszenzlicht, und ebenfalls sehr schön grün fluoresziert eine rote Eosinlösung (s. Fig. 6 unserer Tafel „Farbige Lichterscheinungen" bei S. 270). Da das Fluoreszenzlicht auf einer Absorption anderen Lichtes beruht, so kann ein bereits durch eine fluoreszierende Substanz gegangener Lichtstrahl nicht zum zweitenmal Fluoreszenzerscheinungen derselben Art hervorrufen, was sich bestätigt



Saccharimeter von Soleil. Vgl. Text, S. 284.

Sehr schön zeigt auch diese Erscheinung das Bariumplatincyanür, das deshalb dazu benutzt wird, unsichtbares ultraviolettes Licht in Licht von geringerer Brechbarkeit, d. h. in sichtbar violette Strahlen zu verwandeln. Wir haben von dieser Eigenschaft schon auf Seite 246 gesprochen.

Eine andere eigentümliche Lichterscheinung hängt mit dem Fluoreszenzlicht offenbar zusammen. Manche Körper haben die Eigenschaft, im Dunkeln selbst zu leuchten, nachdem sie längere Zeit hellem Lichte ausgesetzt waren. Der Diamant gehört bekanntlich zu diesen Körpern, auch zeigen Verbindungen des Schwefels mit anderen Elementen diese Erscheinung. Man vergleicht sie mit dem Nachtönen einer angeschlagenen Saite. Das absorbierte, nicht in Wärme verwandelte Licht geht hier nicht augenblicklich in das Fluoreszenzlicht über und strahlt deshalb noch einen Augenblick nach der Einwirkung des einstrahlenden Lichtes aus. Die Dauer dieser sogenannten Phosphoreszenz ist aber eine sehr geringe. Man beobachtet sie meist nur, wenn man durch langen Aufenthalt im Dunkeln das Auge besonders empfindlich gemacht hat und die der „Insolation" ausgesetzte Substanz aus dem hellen schnell in den völlig verdunkelten Raum bringt, worauf man die Erscheinung ein paar Sekunden lang deutlich und Spuren vielleicht noch nach einigen Minuten wahrnehmen kann. Die Farbe des Phosphoreszenzlichtes steht zu der des eingestrahlten in derselben Beziehung wie das Fluoreszenzlicht zu dem durchfallenden.

Es muß hier jedoch gleich erwähnt werden, daß das Leuchten des Phosphors im Dunkeln, welches der soeben beschriebenen Erscheinungsreihe ihren Namen gegeben hat, gar nicht in diese gehört. Das Leuchten des Phosphors ist die Begleiterscheinung eines chemischen Vorganges, einer Oxydation, Verbrennung, die ja sehr häufig Lichterscheinungen hervorbringt.

Für unsere Auffassung von dem Wesen der Fluoreszenz sehr interessant ist die Tatsache, daß manche Stoffe, insbesondere gerade der Flußspat (und der Diamant) auch phosphoreszieren, wenn man sie vorher nicht in das Licht gebracht, sondern nur erwärmt hat, jedoch nicht so weit, daß diese Stoffe dadurch etwa ins Glühen gekommen wären. Wir sehen hier, wie zugeführte Energie auch in der Form von Wärme direkt diese Lichterscheinung hervorbringen kann, während bei den Fluoreszenzerscheinungen die sich sonst in Wärme verwandelnde absorbierte Lichtenergie dieselben Wellenbewegungen erregt. Vielleicht findet auch bei der Fluoreszenz zunächst eine Umwandlung des absorbierten Lichtes in Wärme wie gewöhnlich statt, aber diese Wärme wird dann sofort zu der neuen Lichtbewegung verwendet. Da die (nicht strahlende) Wärme für die Ausbreitung ihrer Wirkungen immer eine merklich größere Zeit gebraucht als das Licht, so verstehen wir ohne weiteres die Nachwirkung der Fluoreszenzerscheinung als Phosphoreszenz.

In ganz neues Licht sind diese Phosphoreszenzerscheinungen getreten, seit gefunden wurde, daß auch sie, und zwar in intensivster Weise, durch jenes ganz kurzwellige Licht hervorgerufen werden, das wir nicht mehr als solches sehen. Wir werden später, in dem Kapitel über die neuen Strahlen, erfahren, daß nicht nur das ultraviolette Licht, sondern auch gewisse elektrische Wirkungen und die des rätselhaften Radiums solche kurzen Ätherwellen hervorbringen, in welchen viele Stoffe in ganz wunderbarer Weise aufleuchten.

Von den chemischen Wirkungen des Lichtes haben wir schon wiederholt, namentlich in Bezug auf die Photographie, gesprochen. Auch abgesehen von seinem lebenerhaltenden Einfluß auf die zersetzende Tätigkeit des Chlorophylls arbeitet offenbar das Licht überall bei der Organisation des Lebendigen mit, wiewohl sich wahrscheinlich in den meisten Fällen seine Wirkung vor unseren Augen verbirgt, die nur das fertige Resultat erblicken. (Siehe hierüber die

Betrachtungen auf S. 44). Unter Umständen kann indes das Licht auch ganz plötzliche und vehemente Wirkungen hervorrufen, wie auf das Chlorknallgas, das bei seiner Berührung mit Licht heftig explodiert. Alle diese Einflüsse aber werden hauptsächlich von den violetten und den ultravioletten Strahlen geübt; Strahlen von größeren Wellenlängen haben eine weit schwächere oder gar keine chemische Wirkung. Unten ist die Kurve der chemischen Wirkungen des Lichtes über dem gewöhnlichen Spektrum abgebildet. Eine sehr schwache Wirkung beginnt danach etwas vor der gelben D-Linie; sie steigt dann im Grün plötzlich steil an, erreicht gegen das Ende des sichtbaren Spektrums (H) hin ihr Maximum und fällt nun merklich langsamer im ultravioletten Teile wieder ab. Wir erklärten uns schon früher diese besonderen chemischen Eigenschaften der kleinsten Lichtwellen dadurch, daß diese leichter in das Atomgefüge der Moleküle einzubringen und es zu zerreißen vermögen; denn diese chemischen Wirkungen sind meist trennende: es werden verwickeltere Verbindungen in einfachere, oft sogar in ihre chemischen Elemente zerlegt. Die zu schnellen Schwingungen der kleinsten Wellenlängen geben den kleinen umschwingenden Atomen eines molekularen Systems schließlich so schnelle Bewegungen, daß die innere Anziehungskraft des Systems sie nicht mehr festzuhalten vermag. Auch hier sehen wir, wie bei der Fluoreszenz und Phosphoreszenz, daß das Licht sich sofort in eine höhere Bewegungsform als die Wärme umsetzt.



Kurve der chemischen Lichtwirkung über dem Lichtspektrum.

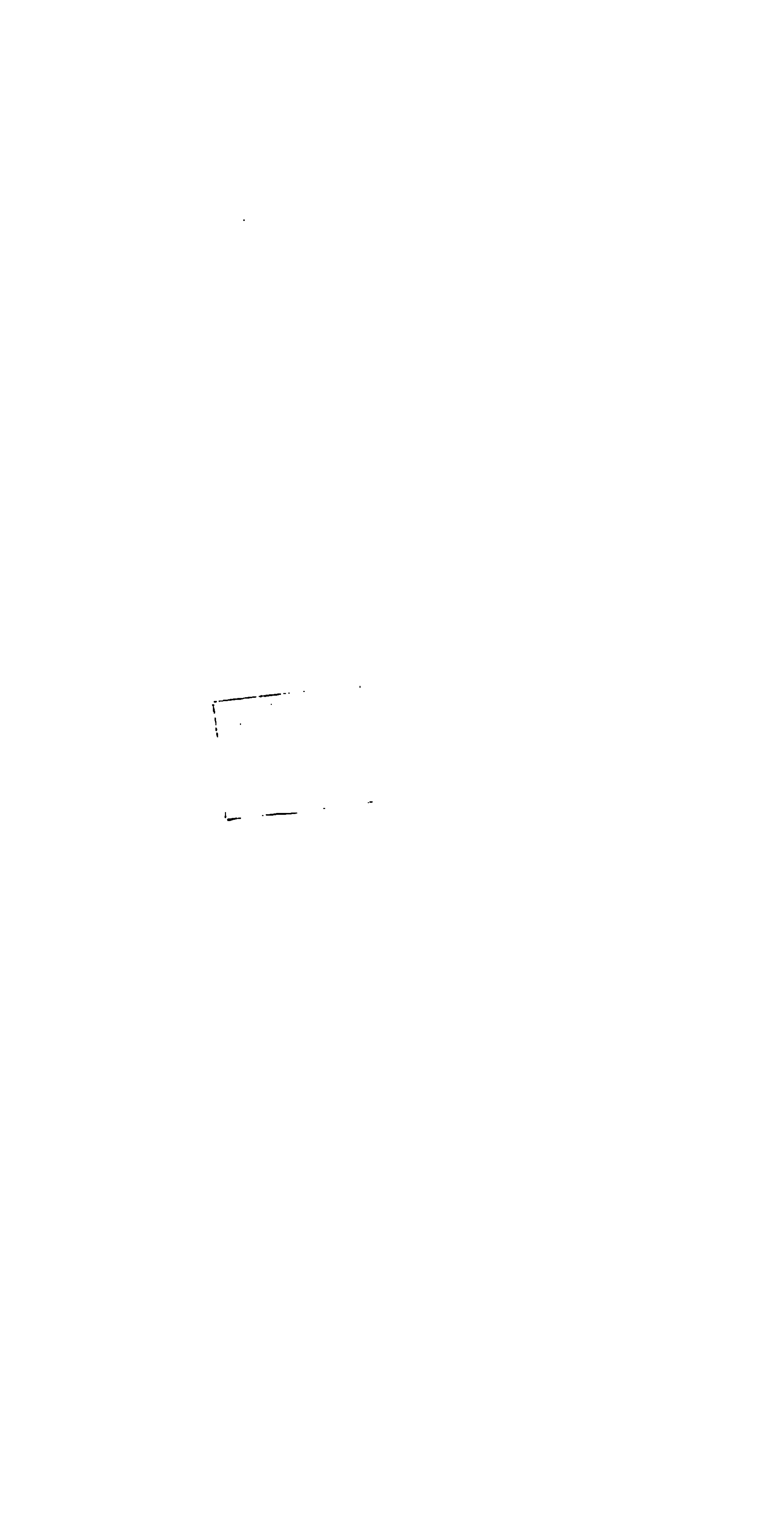
Haben wir hier das Licht chemische Wirkungen auslösen sehen, die in hervorragendem Maße insbesondere der organischen Welt zu gute kommen, so werden wir von vornherein vermuten, daß auch der umgekehrte Fall in der Welt des Lebens vertreten sei, indem die vielfachen chemischen Prozesse im Tier- oder Pflanzenkörper Lichterscheinungen erzeugen, wie sie ja Wärmeschwingungen im reichen Maße hervorbringen. Bei näherem Eingehen stoßen wir indes hier bald auf eine Schwierigkeit. Alles Licht, das wir künstlich durch chemische Prozesse, also durch Verbrennung, erzeugen, wie auch das Licht der selbstleuchtenden Himmelskörper, führt auch Wärmestrahlen, die schon bei unseren künstlichen Beleuchtungszwecken nicht wenig störend sind, ganz abgesehen davon, daß deswegen eine große Menge von Energie — die Erzeugung der großen Wärmewellen verlangt ja deren viel mehr als die des Lichtes allein — unnützerweise mit verbraucht werden muß. Diese großen Wärmewellen zerstören die organischen Gewebe: in unserem künstlichen Lichte verbrennen die Organismen. Können sie wirklich aus sich selbst Licht erzeugen, so darf dies nur aus den höheren Wellenlängen bestehen; es darf keine roten, keine Wärmestrahlen enthalten, es muß blau oder allenfalls grünlich sein. Wir wissen, das dies wirklich zutrifft. Die organische Natur erzeugt mehr Eigenlicht, als man es noch vor kurzem geahnt hätte, da man nur die wenigen leuchtenden Insekten und das Leuchten faulendes Holzes, die Irrlichter im Walde, kannte. Es wurde schon früher erwähnt, daß die Tiefseeforschung eine große Menge von Tierformen vom ewig finsteren Grunde des Meeres heraufgeholt hat, die mit offenbar sehr kräftigen Leuchtorganen ausgestattet sind, mit deren Hilfe sie ihren Weg dort unten finden (s. die Farbentafel „Leuchtende Tiere der Tiefsee" bei Seite 288). Das Meeresleuchten wird von Myriaden leuchtender Bakterien hervorgebracht, und letzthin hat man es verstanden, von diesen allerkleinsten leuchtenden Lebewesen verdichtete Kulturen herzustellen, die so viel Licht geben, daß man sie, in Glasgefäßen eingeschlossen, lebende Lampen nennen muß. Auf Seite 288 ist eine solche nach Dubois abgebildet. Die Bakterien sind in dem Glasgefäße

unten in einem Ölkuchen eingebettet, und man kann die kleinste Schrift bei ihrem Lichte lesen. Wie alle Bakterien sind auch diese Lebewesen außordentlich widerstandsfähig, so daß sie, von der Luft ganz abgeschlossen, ohne weiteres Zutun monatelang ihr geheimnisvolles Licht spenden, bis sie endlich absterben. Dieses Licht ist bei weitem das ökonomischste von allen Lichtsorten, denn es ist stets, wie wir es für notwendig fanden, bläulich oder grünlich, enthält keine gelben oder gar roten Strahlen; es ist demnach ein kaltes Licht. Wir sind hinter das Geheimnis seiner Erzeugung von der Natur noch nicht gekommen. Wer es aufdeckt, wird zweifellos großen Reichtum ernten, denn er wird der dankbaren Menschheit zu einer bedeutenden Ersparnis an Kraft verhelfen. Unter allen heute gebräuchlichen Lichtsorten erfüllt das sogenannte Auerlicht am besten die theoretischen Bedingungen der Ökonomie. Die seltenen Erden (hauptsächlich Thorverbindungen), aus denen die sogenannten Glühstrümpfe für dieses Licht hergestellt werden, zeigen ein eigentümliches spektroskopisches Verhalten. Sie bilden beim Glühen, abweichend von allen anderen festen Körpern, kein vollkommen zusammenhängendes Spektrum; dasselbe besteht vielmehr aus leuchtenden Banden, die im blauen Teile des Spektrums vorherrschen. Beim Erglühen überspringen diese Körper gewissermaßen eine Anzahl von Temperaturgraden und gelangen dadurch bei gleicher Energiezufuhr schneller zu den höheren Schwingungsgraden des Lichtes wie die glühenden Körper mit vollkommen kontinuierlichem Spektrum.



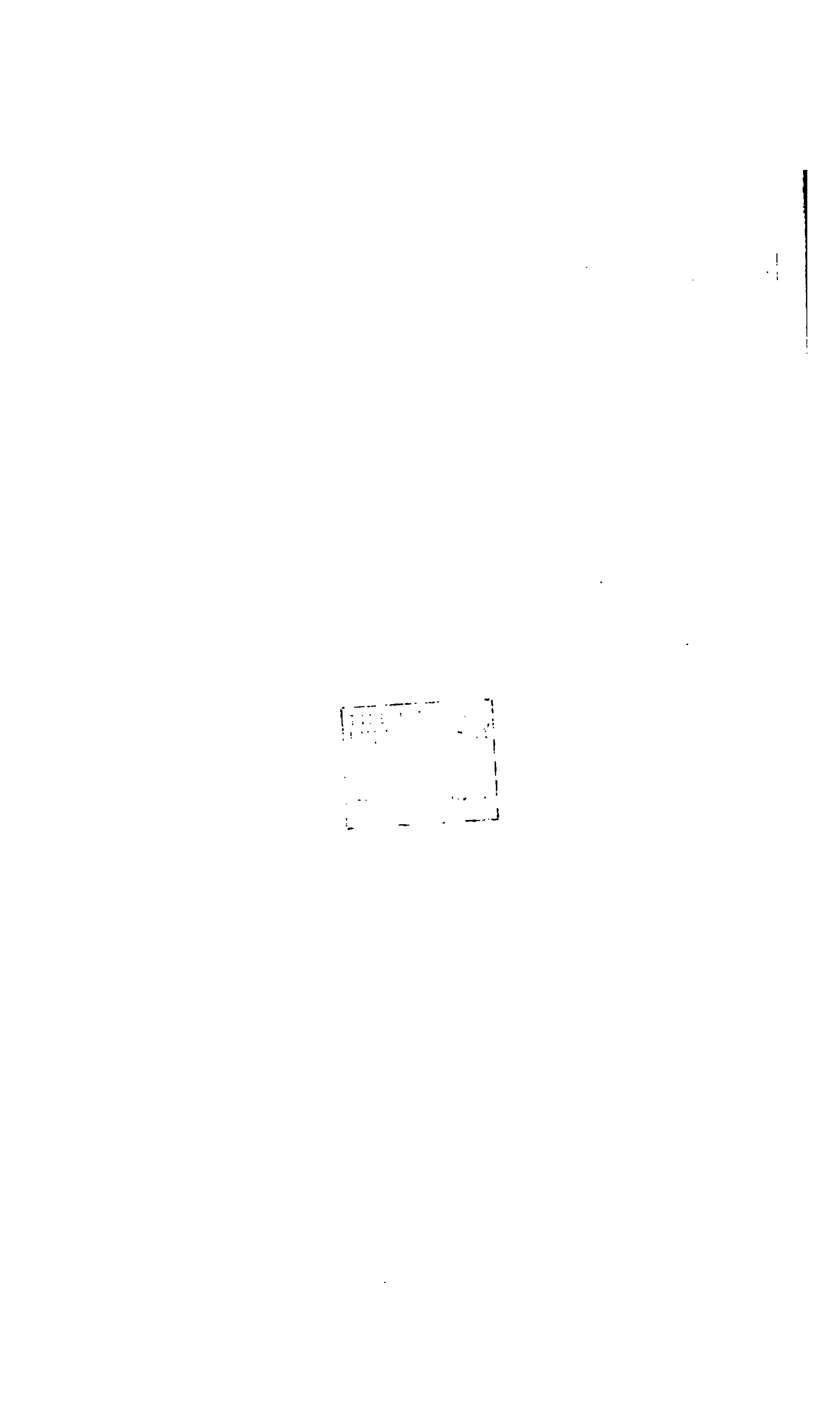
Bakterienlicht. Nach Dubois. Vgl. Text, S. 287.

Dem Geheimnis jener durch gewisse Organismen hervorgerufenen Luminiszenzerscheinungen wird man vielleicht einmal durch eine erst in allerjüngster Zeit entdeckte, vorläufig aber noch immer nicht weniger geheimnisvolle Strahlengattung näher kommen, mit deren wunderbaren Eigenschaften sowohl wie mit den Röntgenstrahlen wir uns erst im zehnten Kapitel näher beschäftigen, nachdem wir die Erscheinungen der Elektrizität kennen gelernt haben; wir meinen die sogenannten Uran- oder Becquerelstrahlen.





Leuchtende Ti



9. Magnetismus und [illegible].

Wir wenden uns nun einem Gebiete von Erscheinungen zu, die in jeder Hinsicht zu den wunderbarsten aller Naturwirkungen gehören, zum Magnetismus und der Elektrizität. Sie umgeben uns überall, und doch hat die Menschheit, die sich heute der Elektrizität als einer allgegenwärtigen und fast allmächtigen Kraft zu den vielseitigsten Zwecken bedient, jahrtausendelang nur einige ganz winzig schwache Wirkungen derselben gekannt, wenn man von der überwältigend großartigen Erscheinung der Blitze absieht, die als die Äußerung einer übernatürlichen Macht angesehen wurden. Zuverlässige genauere Erfahrungen über die Wirkungen der Elektrizität und des Magnetismus sind erst ganz jungen Datums. Die allerersten ernsthaften Versuche, die sich mit dieser Erscheinungsgruppe befaßten, liegen nicht mehr als drei Jahrhunderte zurück; aber den ersten kräftigeren Anstoß zu einer dauernden Beschäftigung der Physiker mit ihr gab doch erst die zufällige Entdeckung Galvanis oder eigentlich seiner Frau, die 1789 den Froschschenkel in der Nähe einer arbeitenden Elektrisiermaschine zucken sah. Systematische und überall grundlegende Untersuchungen über das elektromagnetische Gebiet



Michael Faraday. Nach [illegible]. „Das 19. Jahrhundert in Bildnissen“.

wurden dann um 1840 von dem genialen Faraday ausgeführt, der aus der Buchbinderwerkstatt heraus zu einem der bedeutendsten und namentlich erfolgreichsten unter den denkenden Experimentalphysikern geworden ist. Kaum mehr als ein Jahrzehnt sind dagegen die epochemachenden Entdeckungen des leider so früh verstorbenen Heinrich Hertz alt, durch welche wir zuerst einen experimentell belegten Einblick in das Wesen dieser bis dahin ganz und gar geheimnisvollen Erscheinungen gewonnen haben, so daß wir nun erst beginnen können, die Elektrizität in das Gesamtbild der übrigen Naturerscheinungen einzuordnen.

Es wuchs in ganz erstaunlich kurzer Zeit das gewaltige Gebäude der modernen Elektrizitätslehre empor, und ihre praktischen Resultate sind von so wunderbarer Art, daß die überschwenglichste Phantasie eines Dichters vor wenigen Jahrzehnten sich das nicht hätte träumen

lassen, was die Elektrizität heute zur Wirklichkeit macht. Man dürfte heute unseren Kindern gar keine Märchen mehr erzählen, denn was sie alltäglich ausgeführt sehen, macht ihnen die Möglichkeit aller jener übernatürlichen Dinge durchaus wahrscheinlich. Es seien nur die Wagen genannt, welche ohne jeden sichtbaren Antrieb dahineilen und dabei eine feurige Spur hinter sich herziehen, oder die Gespräche, die man über weite Länderstrecken hin führt, als befände man sich in ein und demselben Raume, oder der Austausch telegraphischer Zeichen ohne jede Verbindung der beiden Apparate, die über Meilen hinweg, wie von Geisterhand geführt, die gleichen Bewegungen ausführen. Der zwar ungemein phantasievolle, aber auch praktische und in seinen von der Phantasie geleiteten Ausführungen erfolgreiche Elektrotechniker Tesla, der es erreichte, seine Apparate in „amerikanischen" Dimensionen auszuführen, hat jüngst ausgesprochen, daß durchaus die Zeit herangekommen sei, die es uns ermöglicht, unsere Gedanken über den Erdball hinweg mit intelligenten Wesen anderer Himmelswelten auszutauschen, und er glaubt, anderseits geheimnisvolle elektrische Wellen außerirdischen Ursprungs im Erdinneren entdeckt zu haben, die als uns von anderen entwickelteren Intelligenzen jenseits unseres trüben Dunstkreises zukommende Zeichen gedeutet werden könnten, aber von uns beschränkten Zweiflern nicht verstanden werden. Unmöglich ist dem geschmeidigen Geiste der Elektrizität fast nichts mehr, und wir sollten deshalb Möglichkeiten, wie die hier berührte, die uns ganz ungeahnte Perspektiven eröffnet, nicht schlechtweg von der Hand weisen.

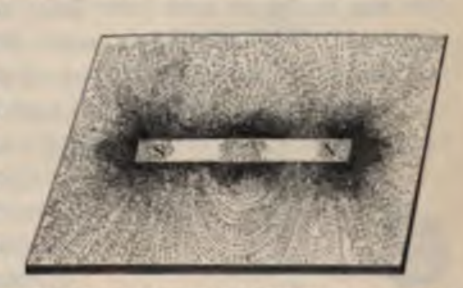
Der Grund für das lange Verborgenbleiben einer so ausgedehnten Gruppe von Naturwirkungen ist leicht gefunden. Wir besitzen kein Aufnahmeorgan für dieselben, wie wir es für den Schall im Ohr, für die Wärme in unserer Hautempfindlichkeit, für das Licht im Auge kennen gelernt haben. Trat uns bereits bei der Erforschung der Wärmeerscheinungen die Unvollkommenheit unseres Auffassungsvermögens für sie vielfach störend in den Weg, so daß wir uns meist anderer Sinnesorgane bedienen mußten, als der für die Auffassung der Wärme geschaffenen, um deren Wirkungen genauer kennen zu lernen, so fehlt uns für die direkte Aufnahme und Beurteilung der Elektrizität das richtige Organ, und wir können deshalb nur diejenigen Begleiterscheinungen der Kraft wahrnehmen, die in das Gebiet der nicht für elektrische Wirkungen geschaffenen Sinnesorgane hinüberspielen. Wir sind in Bezug auf die Elektrizität in genau derselben Lage wie ein Blinder für das Licht. Außer seiner Hauptwirkung auf das Auge hat das Licht ja noch Nebenerscheinungen, z. B. chemische und Wärmewirkungen. Diese würde ein Blinder allenfalls erkennen können. Man stelle sich indes vor, welche Schwierigkeiten er haben würde, wenn er aus jenen minimalen Wirkungen eine vollständige Theorie des Lichtes ableiten sollte. Die Möglichkeit dazu ist aber durchaus wegen des allgemeinen Zusammenhanges der Dinge vorhanden.

Diese geringen Nebenwirkungen des Magnetismus und der Elektrizität, die man seit alters her kannte, sind die anziehende Kraft des Magnetsteins, die Richtkraft der Magnetnadel und die anziehende Kraft des geriebenen Bernsteins (Elektron) auf sehr leichte Körper. Auf diese wenigen Tatsachen war so ziemlich die ganze Kenntnis des Altertums und Mittelalters über jenes ungeheure Gebiet von Naturerscheinungen beschränkt, das heute die Welt beherrscht. Mit der Betrachtung dieser einfachen Erfahrungen wollen auch wir beginnen, um von ihnen aus das stolze Gebäude dieses interessantesten aller Wissenszweige über die Bewegungen in der Natur aufzubauen. Zwar werden wir die Bausteine dazu nicht in historischer Reihenfolge aufeinanderlegen, denn die Geschichte der Elektrizitätslehre hat vielfache Irrwege gemacht, sondern wir schlagen denjenigen Weg ein, der uns nach den jüngsten, so ungemein klärenden Erfahrungen

über das Weſen dieſer Naturkraft am ſchnellſten wieder zu unſerem bereits gewonnenen, die Einheit der Naturwirkungen überblickenden Standpunkte zurückführt.

a) Der Magnetismus.

Schon im griechiſchen Altertum und vorher noch den Chineſen war es bekannt, daß ein gewiſſes Erz, der **Magnetſtein**, ſo genannt, weil er zuerſt bei der Stadt Magneſia entdeckt worden ſein ſoll, die geheimnisvolle Kraft hat, Eiſen anzuziehen. Das Mineral ſelbſt, **Magneteiſenerz**, kommt ziemlich häufig vor, ohne jedoch immer jene magnetiſche Eigenſchaft zu beſitzen. Es iſt eine harte, ſchwarzkörnige, eiſenglänzende Maſſe, die ſich chemiſch aus Eiſen und Sauerſtoff zuſammenſetzt, alſo dem gewöhnlichen Eiſenroſte nahe verwandt iſt, nur daß das Magneteiſenerz weniger Sauerſtoff enthält. Man findet es ſehr häufig anderen Geſteinsarten beigemiſcht, beſonders den ſogenannten plutoniſchen und vulkaniſchen, ſo auch den Granitgeſteinen hoher Berggipfel. Hier bemerkt man oft ſeine Gegenwart durch die Ablenkung der Magnetnadel. Daraus mag die ſowohl im klaſſiſchen Altertume, wie auch wieder bei den Chineſen anzutreffende Fabel von den Magnetbergen entſtanden ſein, die den nahenden Schiffen den Untergang bringen ſollten, indem ſie alle eiſernen Nägel aus den Planken zögen. In Wirklichkeit kommt nirgends auf der Erde eine derartige Anſammlung von magnetiſchem Eiſenerz vor, daß ſie auch nur entfernt ähnliche Wirkungen ausüben könnte. Man hat gefunden, daß magnetiſches Eiſenerz am häufigſten in iſoliert ſtehenden Bergkegeln, weniger in großen Eiſenerzlagern und gar nicht im Erdinneren vorkommt. Wir werden nun ſpäter ſehen, daß gewöhnliches Eiſen unter der Einwirkung eines elektriſchen Stromes magnetiſch wird, und ferner, daß der Blitz ein ſolcher elektriſcher Strom von ungeheurer Stärke iſt. Man iſt deshalb heute der Meinung, daß das gewöhnliche Eiſenerz unter der Wirkung eines Blitzſchlages magnetiſiert worden iſt, daß alſo jener magnetiſche Zuſtand überhaupt keinem Mineral an ſich zukommt, ſondern ihm erſt durch eine beſondere Einwirkung, und zwar nur vorübergehend, zuerteilt wurde.



Verteilung von Eiſenfeilſpänen um einen Magneten. N Nordpol, S Südpol. Vgl. Text, S. 292.

Zu dieſer wunderbaren Eigenſchaft des **natürlichen Magnets**, Eiſen anzuziehen, tritt nun noch die andere, dieſe Fähigkeit mit großer Leichtigkeit auf Eiſen ſelbſt zu übertragen. Durch bloßes Beſtreichen von möglichſt hartem Eiſen, alſo von Stahl, mit ſolchem Magnetſtein wird dieſes ſelbſt zu einem **künſtlichen** Magnet, der ſeinerſeits wieder Eiſen anzieht und gleichfalls ſeinen Magnetismus wieder übertragen kann, ohne von dem ſeinigen dadurch merklich zu verlieren. Mit ſolchen künſtlichen Magneten, denen man jede für unſere Zwecke erwünſchte Form geben kann, beginnen wir unſere Unterſuchungen über die geheimnisvolle Kraft.

Man unterſcheidet namentlich **Hufeiſen-** und **Stabmagnete**. Nähert man ein Ende eines Stabmagneten einem kleineren Stückchen Eiſen, etwa einem Nagel, ſo ſpringt dieſes ſchließlich auf den Magnet zu und bleibt, wenn es nicht zu ſchwer iſt, an deſſen äußerſtem Ende hängen. Beide Enden wirken in gleich ſtarker Weiſe, nicht aber die Mitte des Magnets, die ſtets unmagnetiſch bleibt: die Anziehungskraft nimmt von der Mitte nach den Enden hin regelmäßig zu. Man kann dies auch beſonders deutlich beobachten, wenn man den auf ein weißes

Stück Papier gelegten Stabmagnet vorsichtig mit Eisenfeilspänen bestreut; die einzelnen Teilchen derselben ordnen sich dann zu eigentümlichen krummen Linien, die sich an den Enden des Magnets besonders dicht zusammendrängen, sich in weitem Bogen um die Mitte krümmen und über dieser zusammenschließen (s. die Abbildung, S. 291). An der Mitte des Stabes selbst haften keine Eisenteilchen. Die Kraft des Magnets drängt sich nach den beiden Enden hin, die man seine **Pole** nennt; sie **polarisiert** sich.



Magnetische Kette.

Diese Anziehungskraft aber übt der Magnet — wir sehen zunächst von einschränkenden feineren Untersuchungen ab und halten uns nur an die augenfälligen Äußerungen — ausschließlich auf Eisen aus. Alle anderen Stoffe verhalten sich ihr gegenüber völlig teilnahmlos und sind zugleich für sie durchlässig, **diamagnetisch**, während im Gegensatze hierzu das Eisen **paramagnetisch** ist. Papier, viel leichter als Eisen, rührt sich nicht, auch nicht in größter Nähe eines starken Magnets. Hält man es aber an einen seiner Pole, so wird ein eiserner Nagel auch durch dieses hindurch angezogen. Ebenso zeigen Holz, andere Metalle und sonstige Stoffe eine mehr oder weniger vollkommene Durchsichtigkeit für diese rätselhafte Kraft.

Wir halten an einen vom Pol eines Magnets festgehaltenen Nagel unten einen zweiten; dann haftet dieser an dem ersten, wohl auch noch ein dritter an dem zweiten, und so weiter (s. die obenstehende Abbildung). Die magnetische Kraft wird durch eine solche **magnetische Kette** hindurch viel weiter geführt, als sie durch den freien Raum wirken würde. Wenn man zwischen jenem dritten Nagel und dem Magnetpol die beiden anderen entfernt, so vermag der Magnet jenen nicht mehr zu sich heranzuziehen. Dies erklärt sich dadurch, daß die mit dem Magnet in Berührung kommenden Nägel zeitweilig selbst zu Magneten werden, wie man sehen kann, wenn man einen Eisenstab festklemmt und ihm den Pol eines Magnets nur nähert; der vorher unmagnetische Stab zieht dann am anderen Ende so lange anderes Eisen an, als der Magnetpol sich in der Nähe befindet, wird aber nach der Entfernung sofort wieder unwirksam (s. die nebenstehende Abbildung).



Magnetische Influenz.

Durch Bestreichen mit einem Magnet wird Stahl **permanent magnetisch**, durch den Einfluß der bloßen Annäherung dagegen nur vorübergehend, **temporär magnetisch**. Die hierbei stattfindende Einwirkung nennt man **magnetische Influenz**.

Auffällig anders aber verhält sich ein permanent magnetischer Eisenstab in der Nähe eines anderen Magnets. Während sich Eisen und Magnet unter allen Umständen gegenseitig anziehen, können zwei Magnete sich einander **abstoßen**. Es hängt die Anziehung oder Abstoßung von der Lage der Magnete zueinander ab. Obgleich die beiden Pole eines Magnets sich sonst in keiner Weise

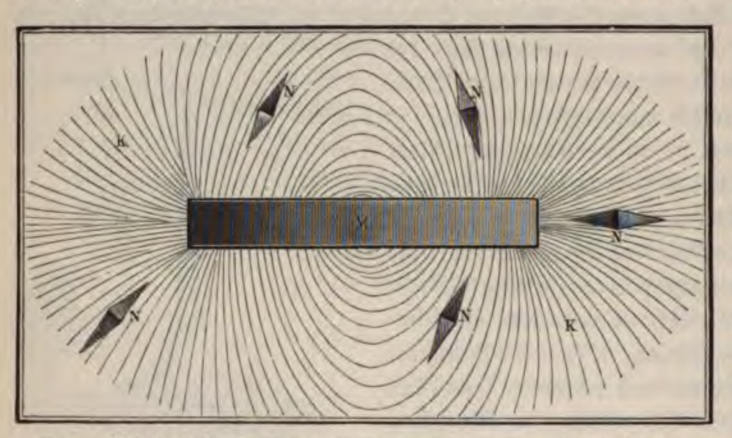
voneinander unterscheiden, verhalten sie sich doch verschieden einem zweiten Magnet gegenüber. Danach bezeichnen wir, zunächst ganz willkürlich, die eine Seite der beiden Stabmagnete als ihren Nordpol, die andere als den Südpol, und erkennen, daß immer nur bestimmte Seiten einander anziehen oder abstoßen. Da die Bezeichnung der Pole des zweiten Magnets in Bezug auf die gegenseitige Anziehung zunächst eine willkürliche ist und die Pole sich sonst nicht unterscheiden, so nehmen wir an, daß der Nordpol eines Magnets den Südpol eines anderen anzieht, den Nordpol aber abstößt, daß also die ungleichnamigen Pole einander zu vereinigen, die gleichnamigen einander zu fliehen trachten. Am leichtesten können wir die betreffenden Wahrnehmungen mit Hilfe eines nadelförmig zugespitzten Magnets machen, den wir in seiner Mitte auf eine Spitze setzen und sich auf ihr frei zu bewegen gestatten. Es ist dies eine Magnetnadel von der allbekannten Form (s. die untenstehende Abbildung).

Auch hier wird die eine Seite der Nadel als Nordpol, die andere als Südpol bezeichnet; immer nur ein bestimmtes Ende wendet sie der einen Seite des in ihre Nähe gebrachten Magnets zu, dreht sich aber sofort um, wenn die andere Seite des Magnets ihr genähert wird. Bilden wir um einen Stabmagneten wieder jene Linien aus Eisenfeilspänen, so stellt sich eine Magnetnadel, die in der Nähe jenes Magnets eine beliebige Lage einnimmt, immer in die Richtung jener Linien (s. die Abbildung, S. 294), die also die Richtung der Kraft, mit welcher der Magnet anzieht oder abstößt, bestimmen. Man nennt sie deshalb magnetische Kraftlinien, und das Gebiet, in dem man bei feineren Untersuchungen solche Linien, d. h. die Wirkungskraft des Magnets, überhaupt noch verfolgen kann, das magnetische Feld. Es ist ohne weiteres zu übersehen, daß ein frei bewegliches Partikelchen, das nur jener magnetischen Kraft gehorcht, längs jener Kraftlinien von einem Pol zum anderen fliegen würde. Träfe es hier auf keinen Widerstand, wäre es also so klein, wie etwa die Ätheratome, deren Bewegungen wir alle bisher betrachteten Naturwirkungen zuschreiben konnten, so würde es infolge der Beschleunigung oder seiner Trägheit (s. S. 46) am Pol vorüber durch den Magnet eilen, am anderen Ende wieder austreten und seinen Weg aufs neue beginnen. Der Äther würde einen Wirbel rings um den Magnet bilden. Während der Strom sich außen im weiten Bogen um den Magnet ausdehnt, würde er sich in dessen Innerem stark zusammendrängen, der Magnet somit gewissermaßen eine Röhre bilden, die auf der einen Seite den Äther durch eine geheimnisvolle Kraft in sich einsaugt und auf der anderen wieder ausstößt. Dieses Bild wenigstens geben uns die Kraftlinien. Sehr charakteristisch zeigen diese sich auch, wenn man sie bei einem kleinen Magnet verfolgt, der sich in der Nähe eines größeren befindet. Die Kraftlinien des letzteren werden dann so abgelenkt, daß es, wie die obere Abbildung, S. 295 zeigt, ganz augenfällig den Anschein hat, als würden sie in denselben hineingesogen, wenn die ungleichnamigen Pole einander zugewendet sind. Dagegen bemerkt man bei umgekehrter Stellung eine deutliche, von dem kleineren Magnet ausgehende Gegenströmung.


Magnetnadel.

Wir wollen schon an dieser Stelle das weitere Sammeln beobachteter Tatsachen über diese geheimnisvolle Kraft einen Augenblick unterbrechen, um wenigstens eine vorläufige Stellung zu ihr vom Standpunkt unserer atomistischen Grundanschauung zu nehmen.

Diese verwarf von vornherein jede Fernwirkung der Materie aufeinander, und es gelang uns tatsächlich, die allgemeine Anziehungskraft durch direkte Wirkung von Stößen des weltdurchdringenden Äthers wenigstens anschaulich zu machen. Hier in den Erscheinungen des Magnetismus haben wir aber offenbar eine Anziehungskraft vor uns, die mit der der Massen gar nichts zu tun hat. Sie kann nicht etwa eine durch irgend welche Umstände hervorgerufene Verstärkung jener Kraft sein, denn die Massenanziehung wirkt auf alle Körper genau in gleicher Weise; die Materie hat für sie, wie vielseitig sich auch sonst ihre Eigenschaften zergliedern, doch nur eine Eigenschaft, die der Raumausfüllung. Ganz anders ist es mit dem Magnetismus. Er geht, soviel wir bisher von ihm erfahren haben, nur von einer einzigen unter den unendlich vielen Stoffverbindungen, vom Eisen aus, und sollten wir später erfahren, daß auch andere Stoffe vergleichbare Eigenschaften haben, so sind diese doch quantitativ untereinander sehr verschieden, da wir solche Wirkungen ja gewöhnlich überhaupt nicht mehr wahrnehmen. Aber auch bei ein und demselben Stoff, dem Eisen, schwankt diese Anziehungskraft beständig und unter den verschiedensten Einflüssen, ja sie kann sogar in Abstoßung übergehen. Die allgemeine Anziehung erklärten wir daraus, daß die Körper gegen die von allen Seiten kommenden Ätherströme einen Schirm bilden, aber wir erkannten auch zugleich, wie ungemein porös dieser Schirm dem Äther gegenüber ist; deshalb können nur sehr große Körper, wie z. B. die Erde, eine für uns merkliche Wirkung ausüben. Die magnetische Kraft ist selbst in ihren geringsten Wirkungen unvergleichlich viel größer als die Schwerkraft. Der Augenschein lehrt dies, und wir werden noch ein genaueres Maß dafür später finden. Wo nehmen wir den fast unendlich dichten Schirm her, der dem einseitig nach dem Magnet hindrängenden Ätherstrome jene bedeutende Dichte geben könnte, damit seine Stöße die Magnetanziehung erklären? Kurz, es ist völlig unmöglich, den Magnetismus auf eine ähnliche Weise zu erklären wie die Schwerkraft. Es scheint geradezu, als ob an ihm die Allgemeingültigkeit unserer atomistischen Anschauungen im Grund erschüttert werden müßte, und als ob diese rätselhafte Anziehung wirklich eine innere Kraft des Magnets sei, die von ihm ohne nachweisbare Vermittelung ausstrahlt.

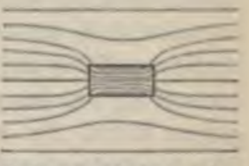


Magnetisches Feld. M Magnet, N Magnetnadeln, K Magnetische Kraftlinien. Vgl. Text, S. 293.

Aber wir wollen doch die Flinte nicht so schnell ins Korn werfen und wenigstens nach einer neuen hypothetischen Annahme suchen, die innerhalb unserer Anschauungen erlaubt ist und den Erscheinungen gerecht wird.

Unsere Kraftlinien geben uns dazu einen guten Fingerzeig. Sie deuten darauf hin, daß der Magnet auf den umgebenden Äther saugend wirkt. Die Luft kommt dabei gar nicht in Betracht, weil die magnetischen Wirkungen ja auch im luftleeren Raume stattfinden. Dieses Saugen

ist nur durch innere molekulare Wirkungen zu erklären. Wir wissen von den Molekülen, daß sie kleine Weltsysteme bilden, in denen die einzelnen, sie zusammensetzenden Atome Umlaufsbewegungen ausführen. Nur hierdurch konnten wir die Erscheinungen der Wärme und des Lichtes erklären, indem wir die Wechselwirkungen verfolgten, welche zwischen den freien Ätheratomen und diesen Systemen auftreten. Eine saugende Wirkung solcher umschwingenden Systeme entsteht nun sofort, wenn sie sich zu Gruppen ordnen, deren Umschwungsbewegungen gegeneinander gerichtet sind. Man stelle sich vor, in ein Gefäß mit Wasser würde ein Strahl strömenden Wassers für kurze Zeit eingeführt, so würde das vorher stillstehende Wasser seitlich von dem Strahl mitgerissen werden und zu beiden Seiten desselben einen Strudel, eine Wirbelbewegung erzeugen, die eine Weile anhält und allmählich das ganze Wasser in die Bewegung mit hineinreißt, auch wenn der Strahl, der den ersten Anstoß zu der Bewegung gegeben hat, nicht mehr wirkt (s. die untere Abbildung). Die Bewegung des Wassers zeigt in diesem Falle genau dieselben Wirkungslinien wie die eines Magnets und zieht auch Gegenstände in den Strudel, wie ein Magnet. Die Richtung des ursprünglich die Bewegung einleitenden Strahls entspricht der Achse des Magnets, und wir können nun den Vergleich noch täuschender machen, wenn wir den Strahl wirklich durch eine Röhre einführen, welche den Magnet für seine Kraftlinien darstellt.



Zusammendrängen der Kraftlinien in einem Magneten. Vgl. Text, S. 293.

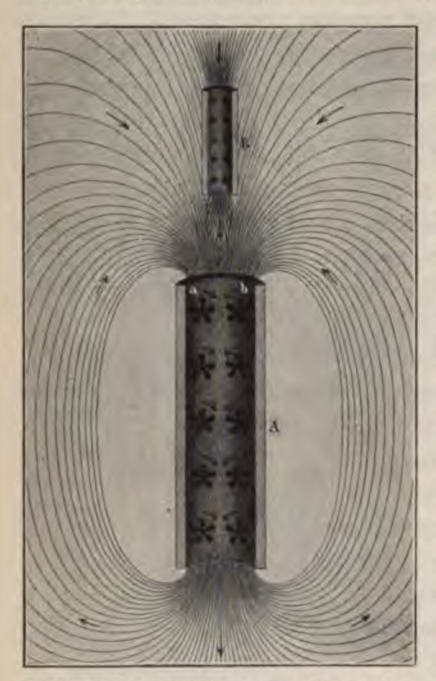
Diesem Vergleich entsprechend müßten wir also annehmen, durch irgend eine äußere Einwirkung sei in das unmagnetische Eisen ein dichter Strom von freien Ätheratomen gedrungen und dieser habe den Molekularsystemen des Eisens jene besondere Gruppierung aufgenötigt, die nachher jene Ätherwirbel erregt, wie sie sich durch die Kraftlinien verraten. Es frägt sich, ob alle Erscheinungen des Magnetismus durch diese Annahme erklärt werden können.

Wir wollen zu dem Zweck zunächst die Erscheinungen im Großen studieren, die bei künstlich erzeugten Wirbeln gleicher Art hervortreten. Um die Wirbel längere Zeit zu erhalten, konstruieren wir einen besonderen Apparat. In einem länglichen Kasten oder einer Röhre A werden zwei Reihen von Schaufelrädern a, b so angebracht, daß die Drehung der einen Reihe entgegengesetzt der der gegenüberliegenden ist (s. die Abbildung, S. 296). Zwischen den beiden entgegengesetzt rotierenden Räderreihen befindet sich ein Spielraum, der durch Verrücken der Reihen gegeneinander vergrößert oder verkleinert werden kann. Die rotierende Bewegung der Räder wird durch eine äußere Kraft im Gang erhalten. Dieser Apparat wird fest inmitten einer Flüssigkeit angebracht, ein anderer kleinerer Röhrenapparat B gleicher Konstruktion möge sich in der Flüssigkeit frei bewegen können. Die Räder der freien Röhre sollen vorerst nicht rotieren. Die feste Röhre bildet nun durch die Bewegung ihrer Räder in der Flüssigkeit jenen Wirbel. Sobald dann die freie, kleinere in den Bereich desselben kommt, beginnt die strömende Flüssigkeit sie wie überhaupt jeden in ihr schwimmenden



Wasserwirbel.

Körper in die größere Röhre hineinzuziehen, auf der Seite, wo infolge der Bewegung der Räder der Strudel in der festen Röhre verschwindet. Da die schwimmende Röhre länglich ist, bringt sie ihre Achse in die Richtung der Strömung, genau so, wie es ein Eisenstäbchen in Bezug auf die Kraftlinien eines Magnets tut. Dadurch dringt die Strömung von oben, d. h. von der Seite her, die über der Einflußöffnung der großen Röhre liegt, in die kleinere Röhre ein, und zwar in diejenige ihrer Öffnungen, die der größeren Röhre abgewandt ist; aus der zugewandten tritt sie wieder aus und gelangt dann weiter direkt in die größere Röhre. Bei diesem Durchströmen der kleineren Röhre werden die in ihr befindlichen, vorher noch ruhenden Räder ihrerseits in rotierende Bewegung gebracht und erzeugen selbst einen Wirbel, der mit dem der größeren Röhre gleichgerichtet ist. In den Magnetismus übersetzt heißt dies: Die kleinere wird durch **Influenz** magnetisch. Hören die Räder des größeren Apparates auf, sich zu bewegen, so fließt, wenigstens nach einer kleinen Weile, der Wirbelstrom nicht mehr, und auch die Räder des kleineren Apparates müssen wieder stillstehen: der nur durch Influenz erregte magnetische Zustand hört auf, wenn man den erregenden Magnet entfernt. Die kleine Nachwirkung, welche wir an unserem „mechanischen Magnet" bemerken, ist auch bei allen wirklichen Magneten zu beobachten; man nennt die Erscheinung den **remanenten Magnetismus**.



Wirbelapparat zur Veranschaulichung des Magnetismus. Vgl. Text, S. 295.

Nun wollen wir aber die Räder unseres kleineren Apparates vorher ebenfalls durch eine äußere Kraft in Bewegung setzen, ihn also in unserem vergleichenden Sinne magnetisieren. Bringen wir ihn dann in die Nähe unseres festen mechanischen Magnets, so wird der von dem ersteren selbständig hervorgebrachte Wirbel mit dem des anderen in Wettstreit treten. Sind die beiderseitigen Strömungen gleich gerichtet, so beschleunigen sie die Hinbewegung des schwimmenden Magnets gegen den festen, sind sie aber entgegengesetzt, so stoßen die Strömungen sich gegenseitig ab; die kleinere Röhre wird von der Strömung umgedreht, damit die ihrige mit jener wieder gleichgerichtet ist. Auch diese Erscheinung haben wir bei den wirklichen Magneten beobachtet, und dies ist alles, was wir bisher von den magnetischen Wirkungen angeführt haben. Für diese wenigen Tatsachen der Beobachtung genügt also vorläufig unsere Wirbel-, bez. Zirkulationshypothese. Es sei aber noch folgendes ergänzend hinzugefügt: unser mechanischer Magnet entspricht insofern nicht unseren molekularen Anschauungen, als ja die Glieder jener mikrokosmischen Systeme in dauernder Rotationsbewegung gedacht werden müssen. In unmagnetischen Körpern nun denken wir uns keine dieser Rotationsrichtungen vorherrschend, so daß ihr Einfluß auf die durchdringenden Ätherströme zu Wirbelbewegungen der beschriebenen Art keinen Anlaß geben kann. Dringt aber von außen her ein irgendwie entstandener, genügend kräftiger Ätherstrom in diese Systemgruppen ein, so muß er ihre rotierenden Bewegungen notwendig so beeinflussen, daß sie mehr oder weniger jene Ordnung aufweisen, durch welche wir die magnetischen Wirbel

entstehen sahen. Das ist eine einfache Folge des Trägheitsgesetzes. Je nach der Stärke des ersten Anstoßes von außen her, also der Magnetisierung, wird die Rotation der Moleküle, beziehungsweise der Räder, länger andauern, wird also der Körper länger magnetisch bleiben. Sind nun zwar die Widerstände, welche sich den molekularen Bewegungen entgegenstellen, wesentlich geringer, als wir sie bei unseren Maschinen oder entsprechenden Apparaten anzutreffen gewohnt sind, so muß doch schließlich wegen der Arbeit, welche ein Magnet nach außen hin zu leisten hat, seiner Kraft ein Ende gesetzt sein. In der Tat verliert sich der magnetische Zustand stets mit der Zeit.

Wir haben aber wohl zu beachten, daß es sich dabei um etwas anderes handelt, als was wir mit dem endlichen Stillstehen unserer Räder in den mechanischen Magneten in Beziehung bringen könnten. Die molekularen Umschwungsbewegungen bestehen dauernd fort, wie der Umschwung der Weltkörper um ihren Schwerpunkt. Höchstens kann die Gegenwirkung des Ätherstromes, den sie selbst erregen, eine ähnliche sein, wie sie das sogenannte widerstehende Mittel im Weltraum auf die Bewegungen der Himmelskörper ausüben muß, das sich aber bisher als so gering herausstellt, daß man nur in wenigen zweifelhaften Fällen messend eine Spur davon entdeckt zu haben glaubt. Für die magnetischen Erscheinungen kommt ja nur eine bestimmte Ordnung der Bahnebenen gegeneinander, oder vielleicht auch nur der rotierenden Bewegung der Atome selbst um ihre Achse in Betracht, die dann dem täglichen Umschwunge der Planetenkörper gleichkäme. Setzen wir den Fall, unsere Erde sei ein Doppelplanet, wie es ja sehr viele Doppelsterne am Himmel gibt, beide Körper befänden sich relativ nahe beieinander und ihre tägliche Umschwungsbewegung geschähe einander entgegen, also so, wie zwei Mühlräder sich gegeneinander bewegen. Dann bildet dieser Doppelplanet im widerstehenden Mittel des Weltraumes mit voller Sicherheit einen Wirbel, der in jeder Beziehung die Eigenschaften eines Magnets hat; er wird kleinere Weltkörper nach magnetischen, nicht nach den Gesetzen der Gravitation zu sich heranziehen. Wenn sich unter diesen kleineren Weltkörpern wieder ein Doppelstern befindet, dessen Komponenten sich zunächst in normaler Weise um ihre Achsen drehten, so wird der magnetisch bewegte Ätherstrom sie zu gegeneinander gerichteten, magnetisch geordneten Bewegungen zwingen, also durch Influenz diese Weltkörper magnetisch machen. Das alles ist aus den Gesetzen der allgemeinen Mechanik mit mathematischer Sicherheit zu folgern. Die Bewegungen der Himmelskörper sind nun im allgemeinen anders, unmagnetisch, wenn wir uns so ausdrücken dürfen, geordnet; sie sind gegeneinander ausgeglichen, wie ja die Gesetze der Natur immer den Ausgleich herzustellen suchen. Ebenso sind auch die meisten irdischen Körper unmagnetisch, und nur in ganz besonderen Fällen, nachdem ein besonderer Eingriff stattgefunden hat, tritt dieser Zustand ein. Am Himmel erkennen wir gewisse Nebelgebilde von ungeheuern Ausdehnungen, deren Formen solche nach zwei Seiten umbiegende Wirbelbewegungen verraten. In diese Dunstmassen mag ein anderer Körper eingedrungen sein. Ganz ähnliche Wirbelgebilde können wir im Spiel der Tabakwolken jederzeit uns vor Augen führen. Nach den Prinzipien der Himmelsmechanik haben solche gegeneinander gerichteten Bewegungen keinen dauernden Bestand, wie ja auch der Magnetismus nicht andauert. Die Bahnlagen müssen sich allmählich wieder so ordnen, daß keine Gegeneinanderbewegung mehr vorherrscht.

Nach der üblichen Anschauung über die Vorgänge in einem Magnet stellt man sich ihn aus einer großen Zahl von molekularen Magneten zusammengesetzt vor, von denen also jeder wieder seinen Nord- und Südpol hat. Die molekularen Magnete können sich zwar nicht von der Stelle, aber doch sich richtend bewegen. Diese kleinsten Teile sind beständig magnetisch. Sie

werden sich deshalb so ordnen, daß immer ein Südpol einem Nordpol gegenübersteht, wie aus dem oberen Teil unserer folgenden Zeichnung ersichtlich ist. Dabei ist die sonstige Ordnung willkürlich, solange der Stab nicht magnetisch ist. Es herrscht nach keiner Richtung eine bestimmte Polart vor. Durch die Magnetisierung aber erhalten die Molekularmagnete die notwendig vorherrschende Richtung, wie aus dem unteren Teile der Zeichnung zu ersehen ist. Es ist leicht zu erkennen, wie diese Erklärungsweise noch völlig in veralteten Ansichten über die molekularen Vorgänge steckt, ja wie sie eigentlich gar keine Erklärung ist, sondern den früher auf der Oberfläche liegenden geheimnisvollen Vorgang der Anziehung nur eine Stufe tiefer trägt, zu den Molekülen, die wieder als feste Körper gedacht sind, wie die großen Magnete, während wir doch aus den anderen Zweigen der physikalischen Wissenschaft erfahren, daß die Moleküle noch sehr vielseitige Bewegungen ausführen, die wir bei der Erklärung jeder besonderen Erscheinung mit in Rücksicht ziehen müssen, was wir in diesem Werke zu tun uns immer befleißigen. Wenn wir die Materie nur deshalb in Moleküle und Atome zerlegen, um diesen kleinsten Teilen wieder die Eigenschaften der größeren zu geben, so haben wir offenbar gar nichts gewonnen und bleiben immer wieder in den alten Anschauungen von der Fernwirkung der Naturkräfte stecken.



Veraltete Anschauung der molekularen Magnetstruktur. Oben unmagnetisch, unten magnetisch.

Obwohl nun unsere Anschauung vom Zustandekommen der magnetischen Erscheinungen eine notwendige Folge der mechanischen Gesetze ist, würden wir uns doch eine Leichtfertigkeit zu schulden kommen lassen, wenn wir sie ohne noch tiefer gehende experimentelle Prüfung annehmen würden. Wir wollen deshalb an der Hand unserer neu erworbenen Anschauung weitere Tatsachen über diese Erscheinungsgruppe sammeln.

Die Kraft der künstlich erzeugten magnetischen Wirbel unseres Apparats wird bei gegebener Zahl und Geschwindigkeit der die Moleküle oder Atome vertretenden Räder von deren gegenseitigem Abstand abhängen. Entfernen wir die gegeneinander arbeitenden Räder weiter voneinander, so wird der eingesogene Strom in der Röhre nicht mehr so stark zusammengepreßt und der Wirbel hat weniger Kraft; bei größerer Annäherung tritt der umgekehrte Fall ein. In den wirklichen Magneten können wir die Entfernung der Moleküle voneinander auf zweierlei Weise verändern, erstens indem wir einen Druck oder Zug auf den Magnet ausüben, und zweitens, indem wir ihn erwärmen oder abkühlen, wodurch er sich ausdehnt oder zusammenzieht. Bei allen diesen Einwirkungen verhält sich ein Magnet genau so, wie wir es voraussagen konnten. Zug und Druck verändern die magnetische Kraft sehr merklich, und namentlich wird sie durch Erwärmung wesentlich geschwächt. Bei ca. 775° Wärme ist Eisen überhaupt nicht mehr magnetisierbar. Die Ätherströme erlangen von hier ab unter den umschwingenden Molekülen so weit freie Bahn, daß nur noch Wärme- und Lichtschwingungen von dem in Rotglut übergegangenen Metall ausgehen. Wenn einerseits durch die die Wirbel erzeugende Rotation eine Verdichtung des Ätherstromes in dem Magnet hervorgerufen wird, so muß diese auch in seinem Inneren eine Gegenwirkung leisten: der verdichtete Strom wird die kleinsten Teile des Magnets auseinander zu drücken suchen. In der Tat beobachtet man im Inneren der Magnete entsprechende Spannungsverhältnisse, die als Magnetostriktion bezeichnet werden. So dehnt sich Eisen bei der Magnetisierung aus, wenn

auch nur um ein sehr Geringes (3—4 Millionstel). Eine ganze Reihe von verwandten Erscheinungen werden wir finden, nachdem wir die Beziehungen der Elektrizität zum Magnetismus kennen gelernt haben. Hier sei nur noch eine zuerst höchst merkwürdig erscheinende Eigenschaft der Magnete erwähnt, die sich aus unserer Anschauung ganz von selbst erklärt. Wenn man einen Magnet in beliebige Teile zerbricht, so bildet jeder derselben wieder einen Magnet für sich. Brechen wir z. B. ein Stück von der Seite eines magnetischen Nordpols, so zeigt dieses Stück doch sofort auch einen Südpol; nehmen wir ein Stück aus der Mitte eines Magnets, das also im Zusammenhange mit ihm überhaupt keine magnetische Wirkung zeigt, so wird es für sich bestehend doch zum Magnet. Dasselbe muß mit unserer Röhre stattfinden, wenn wir sie in einzelne kürzere Teile zerschneiden. Solange in jedem Teile nur mindestens je zwei gegeneinander sich drehende Räder verbleiben, erzeugt er auch für sich jene Wirbel.

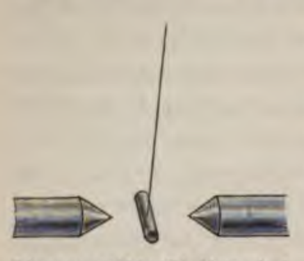
Man kann Eisen durchaus nicht beliebig stark magnetisch machen. Es tritt immer ein Sättigungsgrad ein, der niemals überschritten werden kann. Je größer aber das Eisenstück ist, desto größer ist auch das Maximum seiner Magnetisierbarkeit. Auch dies erklärt sich ohne weiteres. Wenn alle Moleküle in die Ordnung gebracht worden sind, die wir für die Erzeugung des magnetischen Wirbels notwendig fanden, so ist eben keine weitere Verstärkung der Wirkung mehr möglich. Ein großes Stück Eisen aber hat mehr Moleküle wie ein kleines.

Weiches Eisen läßt sich leichter magnetisieren wie der harte Stahl, es verliert aber dafür schneller einen größeren Teil seines Magnetismus, sehr weiches Eisen ist gar nicht im stande, den Magnetismus zu bewahren. Weichheit eines Stoffes bedeutet eine leichtere Beweglichkeit seiner kleinsten Teile unter sich, daraus verstehen wir, daß sich seine Moleküle leichter in jene besondere Lage bringen lassen, aber auch nach dem Aufhören des dazu nötigen besonderen Anstoßes ebenso leicht wieder in die normale Lage zurückkehren. Der magnetische Rückstand im Stahl, dessen Zustandekommen man einer besonderen Koerzitivkraft zuschrieb, macht die Herstellung von permanenten Magneten möglich. Sehr charakteristisch ist der Umstand, daß der oft auch in weichem Eisen bleibende magnetische Rückstand sich durch Erschütterungen des Eisens verliert. Es handelt sich also hier um sehr geringe Widerstände gegen die Wiederherstellung der normalen Ordnung. Ebenso wird eine mit Eisenfeilspänen gefüllte und magnetisierte Glasröhre nach dem Durcheinanderschütteln der Späne wieder unmagnetisch.

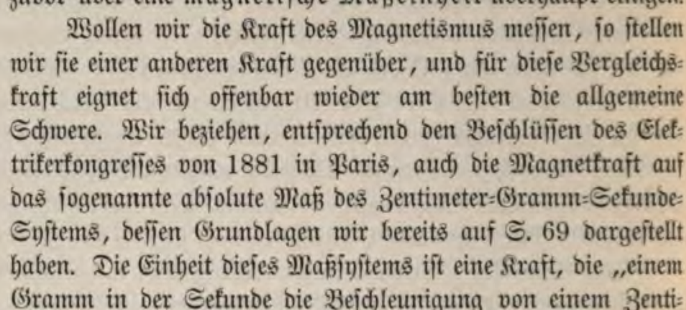
Trotz aller dieser Übereinstimmungen zwischen unserer Hypothese und den experimentellen Tatsachen bliebe diese ganze Erscheinungsreihe doch höchst rätselhaft, wenn man sie nur an diesem einzigen Stoff unter den Tausenden verschiedener Stoffverbindungen, zu denen sich die Materie gruppiert, dem Eisen, wahrnehmen würde. Aber es zeigt sich nach genauerer Untersuchung, daß noch sehr viele andere, ja wahrscheinlich überhaupt alle Körper, magnetische Eigenschaften besitzen. Das ist nach unserer Anschauung auch gar nicht anders möglich. In jenen Wirbeln desselben Äthers, dessen Stöße den Stein zur Erde fallen und die Planeten um ihre Sonnen kreisen lassen, muß alle Materie mitgerissen werden. Nur der Wirkungsgrad kann, entsprechend der Durchlässigkeit des Stoffes für diese Wirbelbewegung, ein verschiedener sein. Dieser Grad der magnetischen Durchlässigkeit braucht begreiflicherweise durchaus nicht in Beziehung zur allgemeinen Durchlässigkeit des Körpers, also zu seiner Dichte, zu stehen. Wir werden indes später sehr merkwürdige Beziehungen zwischen dieser Dichte, den optischen, den elektrischen und den magnetischen Eigenschaften der Stoffe kennen lernen.

Nickel und Kobalt, zwei Metalle, die auch sonst mit dem Eisen große Verwandtschaft haben, zeigen sich nach ihm am meisten magnetisch, doch immerhin sehr wesentlich weniger

als jenes. Alle anderen Körper haben eine noch viel geringere magnetische Erregbarkeit; sie ist für Luft fast ebenso gering wie für den leeren Raum, d. h. für den Äther selbst. Um hier einige vergleichende Zahlen anführen zu können, müssen wir uns zuvor über eine **magnetische Maßeinheit** überhaupt einigen.

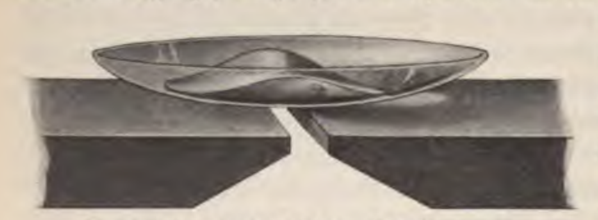


Diamagnetische Stellung des Wismuts zwischen Magnetpolen. Vgl. Text, S. 302.



Wollen wir die Kraft des Magnetismus messen, so stellen wir sie einer anderen Kraft gegenüber, und für diese Vergleichskraft eignet sich offenbar wieder am besten die allgemeine Schwere. Wir beziehen, entsprechend den Beschlüssen des Elektrikerkongresses von 1881 in Paris, auch die Magnetkraft auf das sogenannte absolute Maß des Zentimeter-Gramm-Sekunde-Systems, dessen Grundlagen wir bereits auf S. 69 dargestellt haben. Die Einheit dieses Maßsystems ist eine Kraft, die „einem Gramm in der Sekunde die Beschleunigung von einem Zentimeter“ erteilt. Wir nannten die so definierte Einheitskraft ein Dyn und fanden z. B., daß die Anziehungskraft, welche von 1 kg einer beliebigen Masse ausgeht, aus 10 cm Entfernung 0,000666 Dynen beträgt. Die Anziehungskraft, welche die Erde auf ein Gewichtstück von nur 0,00068 mg (Milligramm) ausübt, hält bereits jener Anziehungskraft eines Kilogramms die Wage. Wir nehmen nun als Einheit der magnetischen Kraft wieder 1 Dyn. Hängen wir ein Gewicht von 1,02 mg über eine Rolle an einen Faden, so zieht dieser Faden mit der Kraft von 1 Dyn. Wird aber an dem andern Ende des Fadens ein Magnet befestigt, der das Gewicht von 1,02 mg nach oben zieht, und stellen wir ihm einen ganz gleichen Magnet mit dem entgegengesetzten Pol in einer Entfernung von 1 cm gegenüber, so halten sich diese beiden genau das Gleichgewicht, wenn jeder von ihnen der Einheit der magnetischen Maße entspricht. Hierdurch ist also zugleich die **magnetische Einheitskraft**, die **Polstärke** definiert. Um über die Größe dieser Kraft eine Vorstellung zu geben, fügen wir hinzu, daß eine gut magnetisierte stählerne Stricknadel etwa eine zehnfache Kraft ausstrahlt. Wir sehen, wie viel größer die magnetische Kraft gegenüber der allgemeinen Anziehungskraft ist, bei der 1 kg, also etwa die hundertmal größere Masse als die unserer Stricknadel, immer noch eine etwa 15mal geringere Kraft bei gleicher Entfernung ausübt.

Um über die Stärke der magnetischen Kraft nach diesen Bestimmungen genaue Messungen anstellen zu können, haben wir die in verschiedenen Entfernungen vorgenommenen Untersuchungen auf jene Einheitsentfernung von 1 cm zurückzuführen, und dies ist wieder nur nach der Erkenntnis des Gesetzes möglich, nach welchem sich die magnetische Kraft im Raum ausbreitet. Da die Vorgänge, welche hier nur scheinbar eine von dem Magnet ausstrahlende Wirkung zeigen, nach unseren Anschauungen ganz andere sind als bei der Gravitation, der strahlenden Wärme und dem Licht, bei denen wir, entsprechend den Anforderungen der Theorie, das quadratische Ausbreitungsgesetz immer wieder fanden, so war durchaus nicht ohne weiteres anzunehmen, daß dieses auch für die magnetische Kraft gelten müsse. Tatsächlich verwickeln sich hier die Verhältnisse auch für die Beobachtung. Wir können keinen Körper bilden, der nur immer die eine Art von Magnetismus enthält, dessen ganze Masse also zugleich von einem anderen Magneten nur



Magnetisierte Flüssigkeiten. Vgl. Text, S. 302.

angezogen oder abgestoßen wird. Die beiden Pole sind unzertrennlich und wirken einander entgegen. Dennoch hat man es verstanden, aus den beobachteten Tatsachen zu folgern, daß auch die Anziehungskraft solcher idealen Magnete, von denen der eine nur ein Südpol, der andere ein Nordpol wäre, demselben Gesetze folgt, mit welchem die Weltkörper einander anziehen, indem die Kraft mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, aber mit der anziehenden Masse wächst, hier also mit der magnetisierten Masse. Zu Ehren seines Entdeckers wird dieses Gesetz, soweit es sich auf die Magnetkraft bezieht, Coulombs Gesetz genannt.

Nach den gewonnenen Maßbestimmungen hat man, vom reinen Eisen abgesehen, die Magnetisierbarkeit der verschiedenen Stoffe auf den leeren Raum bezogen, für den die Zahl Null gilt, und die folgenden Werte gefunden:

Eisenchlorid . . .	+ 64	Wismut	— 14
Eisensulfat . . .	+ 20	Quecksilber . . .	— 2,61
Sauerstoff . . .	+ 0,12	Wasser	— 0,82
Luft	+ 0,02	Alkohol	— 0,66





Magnetisierte Flammen. Vgl. Text, S. 302.

Wir sehen hier zwei Reihen einander gegenübergestellt, von denen die eine mit einer Eisenverbindung, die andere mit Wismut beginnt, aber mit einem umgekehrten Zeichen versehen ist. Die Körper auf der rechten Seite sind diamagnetisch im Gegensatz zu den paramagnetischen links. Was bedeutet dies? Bringen wir zwischen die Pole eines starken Magnets, den man mit Hilfe elektrischer Ströme herstellen kann, ein längliches Stück Wismut, so stellt es sich nicht, wie ein Eisenstab, in die Richtung vom einen Pol zum anderen, also nicht in die Richtung der magnetischen Kraftlinien, sondern senkrecht dazu (s. die obere Abbildung, S. 300). Es scheint, als ob hier eine ganz neuartige Erscheinung vorläge, die einer besonderen mechanischen Erklärung noch bedarf. Nach einigem Nachdenken aber erkennen wir doch leicht ihre einfache Ursache. Die magnetisch angezogenen Körper müssen sich dem Magnet gegenüber ebenso verhalten wie andere Massen gegenüber der allgemeinen Anziehungskraft. Die oben angegebenen Zahlen entsprechen ihrem spezifischen Gewicht; auf die magnetische Kraft bezogen sind es ihre magnetischen Dichtigkeiten. Ein Stück Holz wird aber im Wasser nach oben, vom Erdmittelpunkt hinweg, getrieben, Blei dagegen nach unten, obgleich beide unter derselben Anziehungskraft der Erde stehen. Das archimedische Prinzip vom Auftrieb (s. S. 118) gilt auch für die Magnetanziehung in einem widerstehenden Mittel, als welches hier der Weltäther anzusehen ist, der sogar fast denselben magnetischen Widerstand leistet wie die Luft. Wismut ist also magnetisch leichter, Eisen schwerer wie Luft. Wismut wird deshalb in Luft oder im Vakuum von der Magnetkraft abgestoßen; es bietet, entsprechend allgemeinen mechanischen Prinzipien, den Kraftlinien seine Breitseite dar, stellt sich äquatorial, statt polar, wie das Eisen. Ist diese Erklärung des Diamagnetismus die richtige, so kann diese Eigenschaft den Körpern nicht an und für sich innewohnen; ein Körper muß diamagnetisch und paramagnetisch sein, je nach der magnetischen Dichte des Mediums, in welchem er sich bewegt: Eisen schwimmt ja auch auf Quecksilber, taucht aber im Wasser unter. Daß dies wirklich der Fall ist, hat Faraday

experimentell bewiesen. Er stellte drei Lösungen eines magnetischen Eisensalzes her in verschiedenen Verdünnungen, wodurch auch der Grad ihrer magnetischen Dichtigkeit bestimmt war. Jede Flüssigkeit wurde in eine Glasröhre gefüllt und verhielt sich in Luft zwischen den Magnetpolen wie Eisen. Anders war es aber, wenn er die Röhren nacheinander in ein Gefäß tauchte, das jene selben Lösungen enthielt. War in dem Gefäß die Lösung dünner als in der Röhre, so stellte sie sich im magnetischen Felde wie gewöhnlich polar, dagegen äquatorial, wenn die Lösung außerhalb dichter war. Hier zeigte also selbst das gelöste Eisen diamagnetische Eigenschaften.



Magnetisierte Flamme.

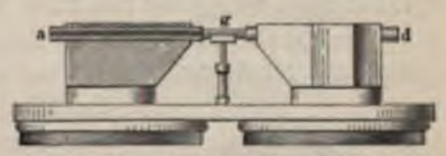
Bringt man in einer Schale Flüssigkeiten über die Pole eines Magnets, so nehmen sie je nach der Art ihres Magnetismus Formen an, die an die kapillare Anziehung oder Abstoßung erinnern (s. die untere Abbildung, S. 300). Auch Flammen sind infolge der in ihnen verbrennenden Gase oder der darin schwebenden kleinen Materieteilchen magnetisch und werden unter der Einwirkung verschieden gestalteter Magnete eigentümlich geformt (s. die Abbildungen, S. 301 und die nebenstehende).

Eigentümlich wie in jeder anderen Beziehung verhalten sich auch dem Magnetismus gegenüber die Kristalle des irregulären Systems, die uns schon bei den Erscheinungen des Lichtes so vielfach beschäftigt haben. Während reguläre Kristalle keine besonderen magnetischen Eigenschaften zeigen, drehen die irregulären Kristalle sich in bestimmter Weise in die Richtung der Kraftlinien, so daß der magnetische Wirbel in ihrem Inneren möglichst geringen Widerstand findet. Wir wissen, daß diese Richtungen geringsten Widerstandes in den Kristallen durch ihre Spaltbarkeit und ihr Verhalten im polarisierten Licht sich verrät (s. S. 279), und können umgekehrt sagen, daß magnetisiertes Eisen durch seine molekularen Gruppierungen Eigenschaften der Kristalle annimmt. Ganz allgemein ist die Magnetisierung eines Stoffes als eine Art beginnender Kristallisation aufzufassen. Im folgenden werden wir noch häufig von ähnlichen Beziehungen zu reden haben.

Anderseits wirkt auch der magnetische Wirbel auf die molekularen Gruppierungen der Kristalle zurück. Die Ebene des polarisierten Lichtes (s. S. 280) wird von der magnetischen Kraft ihrer Richtung entsprechend gedreht. Wiederum Faraday zeigte diese sehr merkwürdige „magneto-optische“ Erscheinung zuerst, indem er zwischen die durchbohrten Pole eines Elektromagnets einen Glasstab (g in unserer obern Abbildung, S. 303) einließ, durch welchen er polarisiertes Licht von a schickte, das in d beobachtet wurde. Während das Gesichtsfeld des

Polarisationsapparates (s. S. 283) dunkel war, solange der Magnet nicht wirkte, wurde es, sobald dessen Kraft einsetzte, aufgehellt und erst wieder dunkel, wenn man den Analysator um einen bestimmten Winkel drehte. Um ebensoviel war also die Polarisationsebene im Glasstabe durch die Magnetkraft gedreht worden.

Sah man bei diesen magneto-optischen Erscheinungen, daß die magnetische Kraft richtend auf die Schwingungen des Lichtes wirkte, so war eigentlich von vornherein zu vermuten, daß sie auch eine Wirkung auf die Größe der Lichtschwingungen haben würde, weil diese Richtungsveränderung notwendig mit einer Absorption der Kraft verbunden sein muß, mit der diese Schwingungen erfolgen. Wenn eine in Rotation befindliche Billardkugel durch diesen „Effet" eine andere Richtung annimmt, als ihre ursprüngliche war, so kann sie dies nur auf Kosten ihrer Rotationsgeschwindigkeit tun. Solche Einwirkung eines starken Magnetfeldes auf die Dauer der Lichtschwingungen wurde wirklich 1897 von Zeeman entdeckt, indem er einen Lichtstrahl spektroskopisch untersuchte, der in der Nähe eines sehr kräftigen Elektromagnets vorbeiging. Es zeigte sich dabei das zunächst sehr überraschende sogenannte Zeemansche Phänomen, daß die einfachen Spektrallinien sich in zwei, drei, sogar acht besondere Linien spalteten. Die Art der Spaltung war eine verschiedene, je nachdem der Strahl parallel oder gekreuzt zu den magnetischen Kraftlinien verlief. Alle diese Linien bestehen aus polarisiertem Licht, und zwar sind ganz bestimmte in der einen Richtung, andere in entgegengesetzter polarisiert. Man kann diese deshalb durch ein Polariskop voneinander trennen, wodurch dann die untenstehenden Typen von Liniengruppen entstehen, in welche sich je eine gewöhnliche Spektrallinie spaltet. Die oberen Gruppen A, B, C u. s. w. zeigen sich in der einen Richtung, die A′, B′, C′ u. s. w. in der anderen polarisiert. Es entstehen also Tripletts, Quartetts, Sextetts u. s. w. aus den einfachen Linien. Theoretisch läßt sich zwar, wie oben angedeutet, die Notwendigkeit dieser Erscheinung aus der Tatsache der Drehung des Lichtes im Magnetfeld im allgemeinen nachweisen, es zeigen sich aber viele Besonderheiten, die noch der Erklärung bedürfen. So werden z. B. einzelne Linien desselben Spektrums in verschiedener Art gespalten. Die D_1-Linie des Natriums zeigt den Spaltungstypus CC_1, die D_2-Linie desselben Spektrums, die sich jener bekanntlich so nahe befindet, daß sie in schwächeren Instrumenten mit jener verschmilzt, hat dagegen im Magnetfelde den Typus DD_1, sie spaltet sich also in sechs neue Linien, während ihre Nachbarin nur in vier zerfällt. Aber gerade diese Besonderheiten werden uns einstmals einen tiefen Einblick in die molekularen Weltsysteme gewähren, welche auf die sie durchdringenden Ätherwellen einen so mannigfaltigen und doch gesetzlich fest geregelten Einfluß üben.



Magnetische Drehung der Polarisationsebene des Lichts. Vgl. Text, S. 302.



Zeemansches Phänomen.

b) Der Erdmagnetismus.

Eine Magnetnadel, wie wir sie schon vielfach angewendet haben, stellt sich, wenn kein anderer Magnet sich in der Nähe befindet, bekanntlich stets in eine bestimmte Richtung von Süden nach Norden, genauer in die Richtung des sogenannten magnetischen Meridians.

Wegen dieser Eigenschaft haben wir den beiden verschieden wirkenden Enden eines Magnets die Unterscheidungen als Nord- und Südpol beigegeben, und zwar nennen wir den nach Norden gewendeten Pol eines Magnets auch seinen Nordpol, obgleich er wegen der Abstoßung gleichnamiger Pole eigentlich umgekehrt bezeichnet werden sollte.

Nach den Erfahrungen, die wir an einer Magnetnadel in Gegenwart eines anderen Magnets gemacht haben, wird man schließen, daß diese Einstellung der Nadel in eine bestimmte Richtung ihren Grund einfach darin hätte, daß die Erde selbst ein großer Magnet sei, oder etwa, daß sich im Erdinneren im hohen Norden sowohl wie im Süden besonders viele kräftige Magneteisensteinlager befinden. Bei genauerer Untersuchung dieser richtenden Kraft der Erde, des Erdmagnetismus, findet man indes, daß die Verhältnisse keineswegs so einfach liegen.

Zunächst fällt die Richtung der Magnetnadel durchaus nicht mit dem astronomischen Meridian, also der Richtung zwischen dem geometrischen Nord- und Südpol der Erde zusammen. Der Winkel zwischen diesem astronomischen und dem magnetischen Meridian, in welchen sich die Nadel einstellt, nennt man die magnetische Deklination. Ihr Wert ist sowohl mit der geographischen Lage wie mit der Zeit veränderlich. 1880 betrug z. B. die Deklination in Paris 16,87° und in London 18,75° und war derart, daß das nach Norden gerichtete Ende der Nadel nach Westen hin gegen den astronomischen Meridian verschoben war. 1698 dagegen betrugen diese Werte für Paris und London nur 7,67° und 7° in der gleichen Richtung. Im 16. Jahrhundert war die Deklination in unseren Gegenden nach Osten gerichtet, und gegenwärtig nimmt die westliche Deklination wieder regelmäßig ab. Die Veränderungen sind durchaus systematisch; man nennt sie die Variation der Deklination.



Schiffskompaß in cardanischer Aufhängung.

Bekanntlich wird diese Richtkraft des Erdmagnetismus zur Orientierung auf hoher See benutzt. Eine zu diesem Zwecke besonders eingerichtete Magnetnadel nennt man einen Kompaß. Die Chinesen sollen dieses Instrument bereits zu Anfang unserer Zeitrechnung in der Form eines kleinen, auf einem Kork befestigten Magnets, den man auf Wasser schwimmen ließ, zu Seefahrtszwecken angewandt haben, ja, es wird von dem um 2700 v. Chr. lebenden Kaiser Hoangti erzählt, daß an seinem Reisewagen eine kleine Figur befestigt war, die immer nach Süden wies. In Europa taucht der Kompaß erst im 14. Jahrhundert, wahrscheinlich aus China eingeführt, auf. Heute ist die Kunst, Kompasse zu bauen und sich nach ihren Weisungen überall richtig zu orientieren, zu einer großen Vollkommenheit gediehen. Man pflegt eine Anzahl dünner Magnetstäbe in theoretisch vorgeschriebener Anordnung auf einer Scheibe, der Kompaßrose, zu verteilen, so daß diese ganze Scheibe, auf der die Himmelsrichtungen in bekannter Weise angegeben sind, von der Richtkraft des Erdmagnetismus gedreht oder, besser gesagt, festgehalten wird, während sich das Schiff unter ihr bewegt. Es werden dadurch die pendelnden Schwingungen der Nadel vermieden; der Kompaß stellt sich sofort ein. Die cardanische Aufhängung der Scheibe, die aus obenstehender Abbildung ersichtlich ist, erlaubt es, daß der Kompaß auch bei den vertikalen Schwankungen des Schiffes horizontal bleibt. Ferner muß durch entsprechende Verteilung von festen Magneten im Kompaßhause nach praktisch ausgeführten Untersuchungen die störende Einwirkung der Eisenteile des Schiffes selbst, die immer etwas

magnetisch werden, die sogenannte Deviation, aufgehoben werden. Die untenstehende Abbildung führt uns auf die Kommandobrücke eines überseeischen Dampfers des Norddeutschen Lloyds, wo hinten, in der Mitte der Brücke, das Kompaßgehäuse aufgestellt ist. Wir erkennen die massive eiserne Kugel, welche als magnetisches Gegengewicht zu den Eisenteilen des Schiffes dient. Über dem Gehäuse befindet sich eine Visiervorrichtung, mit deren Hilfe man die Richtung



Kommandobrücke eines Ozeandampfers des Norddeutschen Lloyd mit Kompaßgehäuse und Peilvorrichtung.

etwa eines Leuchtturms gegenüber der Weisung des Kompasses bestimmen, d. h. den Leuchtturm „anpeilen“ kann. Ganz vorn rechts ist ein Offizier im Begriff mit dem schon früher beschriebenen Sextanten eine Sonnenhöhe zu nehmen.

Die magnetische Deklination nennt der Seemann Mißweisung. Sie ist als ein die Abweichung für den betreffenden Ort darstellender Kompaß auf den Seekarten angegeben. Kolumbus war es, der die Veränderlichkeit dieser Mißweisung mit der geographischen Lage entdeckte, als er trotz genauer Berechnung weitab von dem erwünschten Wege geführt worden war.

Es war deshalb von größter Wichtigkeit für die Schiffahrt, die Elemente des Erdmagnetismus auf das genaueste zu erforschen, und man ist darin heute in der Tat so weit gediehen,

daß auf den oft befahrenen Linien, so zwischen Europa und Amerika, der Schiffsführer auf seiner Kommandobrücke sein Fahrzeug sicherer mit Kompaß und Logg über den Ozean leitet, als durch die Orientierung nach den festen Sternen, die er beinahe als einen wissenschaftlichen Luxus nebenher mit benutzt.

Neben der Deklination zeigt die Magnetnadel auch noch eine Inklination. Hängt man eine solche Nadel so auf, daß sie sich nicht horizontal, sondern nur vertikal bewegen kann, so zeigt ihr Nordende unter einem bestimmten Winkel gegen die Erde hin (s. die untenstehende Abbildung). Diese Richtung der Inklinationsnadel ist gleichfalls mit Ort und Zeit veränderlich. Sie betrug 1893 für Göttingen 66,28°, 1806 dagegen für denselben Ort 69,48°. In den Polargegenden erreicht sie Werte bis zu 90°, so daß hier die Nadel senkrecht nach unten zeigt. Denn hier befindet sich der magnetische Pol, in welchem auch die magnetischen Meridiane zusammentreffen. Der magnetische Nordpol liegt unter 70° nördl. Breite und 264° östl. Länge von Greenwich, also auf einer Insel des arktischen Archipels von Amerika, Boothia Felix. John Roß erreichte diesen merkwürdigen Punkt im Jahre 1831 und sah mit Staunen, wie hier die Magnetnadel auf den Mittelpunkt unseres Planeten hinwies, als sei hier der Sitz jener geheimnisvollen Richtkraft zu suchen. Dem magnetischen Nordpol entspricht natürlich auch ein Südpol auf der anderen Seite. Aber wie man überhaupt nur sehr mangelhafte Kenntnisse von den höheren südlichen Breiten hat, so ist man insbesondere über die magnetischen Verhältnisse in diesen Gegenden praktisch nur ganz oberflächlich orientiert. Hoffentlich werden die in jüngster Zeit von mehreren Nationen unternommenen Südpolarexpeditionen auch diese höchst empfindliche Lücke in der Erforschung der unseren Erdball umspannenden Wechselwirkungen der Naturkräfte ausfüllen.



Inklinationsbussole.

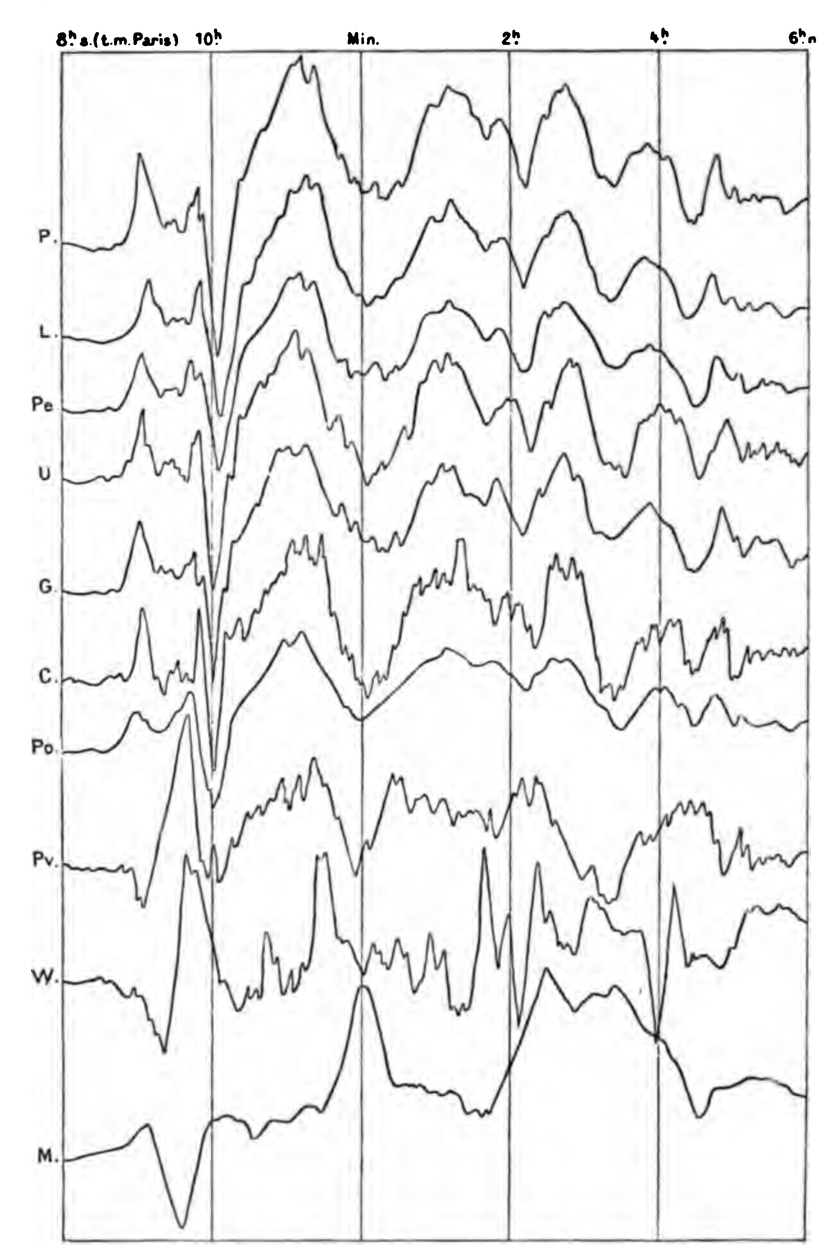
Um eine Anschauung von der Wirkungsweise des Erdmagnetismus zu gewinnen, mußte man von irgend einer Annahme ausgehen. Man versuchte es mit der Hypothese eines Magnets im Mittelpunkte der Erde und stellte sich also die Aufgabe, Lage und Größe eines solchen zu berechnen, der den magnetischen Beobachtungen rings um die Erde herum genügen würde. Diese Aufgabe aber stellte sich als unlösbar heraus, nachdem man die magnetischen Elemente rings um die Erde herum einigermaßen genau studiert hatte, was man namentlich den Anregungen Alexander von Humboldts (s. die Abbildung, S. 307) zu danken hat. Die überall errichteten, mit feinfühligsten Apparaten ausgestatteten magnetischen Observatorien stellten fest, daß, auch abgesehen von lokalen magnetischen Störungen, der Verlauf der magnetischen Kraftlinien über die Erdoberfläche hin kein so einfacher ist, wie es die Voraussetzung eines Zentralmagnets notwendig machen würde. Verbindet man z. B. alle Orte, welche zur gleichen Zeit gleiche Deklinationen haben, durch Linien, Isogonen, so müßten sich diese wie Meridianlinien verteilen, und ebenso würden die Verbindungslinien der Orte mit gleicher Inklination, die Isoklinen, Parallelkreise sein. Wir geben auf S. 308 zwei Weltkarten mit diesen Linien, die auf den ersten Blick zeigen, daß die zweifellos vorhandene, sie bestimmende Gesetzlichkeit doch eine andere, wenn auch ähnliche, ist. Auch mit der Hypothese eines oder zwei exzentrisch im Erdinneren liegender Magnete kam man nicht aus. Gauß in Göttingen stellte deshalb die Annahme einer großen Anzahl kleiner, gleichmäßig in der Erdmasse verteilter Magnete auf, wodurch er den Tatsachen der Beobachtung jedenfalls wesentlich näher kam und dadurch der eigentliche Begründer



Alexander von Humboldt. Nach dem Gemälde von Weitsch in der Berliner Nationalgalerie. Vgl. Text, S. 306.

der Theorie des Erdmagnetismus wurde. Seiner Rechnung gemäß ist die magnetische Achse der Erde von 77° 50′ nördl. Breite nach der gleichen südlichen Breite gerichtet, und zwar von 296° 29′ östl. Länge nach 116° 29′. Die Lage der Pole an der Oberfläche ist gegen

vier geschlossenen Kurven der täglichen durchschnittlichen Bewegung der Magnetnadel hervorgeht, die an weit voneinander abliegenden Orten doch ganz ähnliche Formen zeigen. Auch die Magnetnadel ist dem Urquell aller irdischen Bewegungen unterworfen. So betrug der mittlere Unterschied der Deklination in Göttingen zwischen 8 Uhr früh und 1 Uhr nachmittags im April 1837: 18,8′, im Dezember dagegen nur 5,4′ und zwei Jahre darauf in denselben Stunden und Monaten 14,0′ und 4,1′. Es ist also auch hier ein beständiges Schwanken periodischer Natur. Zu diesem treten schließlich noch plötzliche Zuckungen der Magnetnadel, die oft sehr bedeutende Werte annehmen, so daß man bei der Unruhe der Nadel von heftigen magnetischen Gewittern redet, die sich über unsern ganzen Planeten gleichzeitig verbreiten, wie obenstehende Kurvenzüge beweisen, die von den Magnetnadeln in sehr weit voneinander entfernten Orten selbständig aufgezeichnet wurden. Oft, doch



Zuckungen der Magnetnadel während des magnetischen Gewitters vom 18./19. Mai 1892 in Paris (P), Lyon (L), Perpignan (Pe), Utrecht (U), Greenwich (G), Kopenhagen (C), Pola (Po), Pawlowsk (Pv), Washington (W), Mauricius (M). Nach Mascart.





Fig. 1. Häufigste Form des Nordlichts in Deutschland und dem südlichen Skandinavien.



Fig. 3. Nordlicht, beobachtet von Capron zu Guildford in England, 24. Oktober 1870.

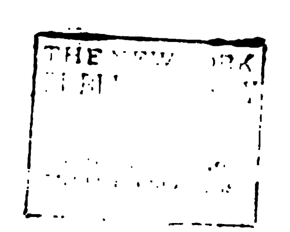
Polar



Fig. 2. Nordlicht, beobachtet von Hayes zu Port Foulke in Grönland, 6. Januar 1861.



Fig. 4. Nordlicht, beobachtet von Capron auf der Hebrideninsel Skye, 11. September 1874.



nicht immer, sind solche Gewitter auch von sichtbaren Erscheinungen begleitet, wie sie beifolgende Tafel zeigt: Polarlichter flammen zu beiden Seiten des Planeten gleichzeitig auf und vereinigen ihre mysteriösen Strahlen weit über den Äquator hinweg. Zuweilen wird auch die Nadel im weltabgeschlossenen magnetischen Observatorium plötzlich unruhig, wenn in 20 Millionen Meilen Entfernung auf unserem Zentralgestirn ein besonders großer Sonnenfleck sich während der Umdrehung der beiden Gestirne gerade uns am nächsten befindet, und mit der allgemeinen elfjährigen Periode der Sonnenfleckenhäufigkeit schwankt auch, wie Wolf in Zürich nachwies, die Periode jener plötzlichen Störungen der Magnetnadel. Nach allen diesen Erfahrungen scheint es wahrscheinlicher, daß die Erde im wesentlichen nicht als ein permanenter Magnet, sondern als ein Influenzmagnet aufzufassen ist, der seine Wirkungen unter den wechselnden Kraftlinien beständig ändert, die von der Sonne und anderen kosmischen Quellen von Ätherwirbeln ausgehen und das Weltgebäude notwendig durchziehen müssen.

Wenn das Licht des Sonnenkörpers bei totalen Verfinsterungen von uns abgehalten ist, sieht man ihn von einem eigentümlichen Scheine, der Corona, umgeben, deren Strahlen sich in einer Weise verbinden, daß sie ungemein an die Kraftlinien eines Magnets erinnern, wie sie die nebenstehende Abbildung in der Anordnung von Eisenstaub um einen scheibenförmigen Magneten zeigt. Hier spielen sich augenscheinlich magnetische oder vielmehr elektrische Vorgänge ab, die den wesentlichsten Anteil an den Bewegungen der Magnetnadel haben werden.

Kraftlinien um einen scheibenförmigen Magneten.

Zu allen diesen großen Wirkungen treten schließlich offenbar noch lokale Einflüsse, die oft auch größere Gebiete umfassen. Auf S. 312 ist eine Karte von Frankreich mit ihren Isogonen abgebildet. Dieselbe zeigt nördlich und südlich von Paris ganz merkwürdige Einknickungen dieser Linien, die keiner äußerlich sichtbaren Ursache, wie etwa Gebirgszügen oder bekannten großen Eisenlagern, zuzuschreiben sind. Jüngst hat man im russischen Gouvernement Kursk, etwa auf dem halben Wege zwischen Moskau und dem Schwarzen Meere, sogar einen vollkommen isolierten magnetischen Nordpol entdeckt, auf dem die Nadel senkrecht nach unten zeigt und die Deklination jeden beliebigen Wert hat. Das Land ist hier eben und besteht aus eocänen Schichtungen, Kreide, Mergel, Kalk u. s. w., also keineswegs aus Gesteinen, die Einschlüsse von größeren Eisenlagern wahrscheinlich machen, die wohl aber in tieferen Schichten sich hier finden müssen. Die Magnetnadel spielt hier eine ähnlich verräterische Rolle wie das Pendel (s. S. 71), indem es magnetisch dichtere oder dünnere Stellen im Erdinneren verrät.

c) Die statische Elektrizität.

Einerseits sehr nahe mit dem Magnetismus verwandt, anderseits scheinbar recht verschieden von diesem ist eine andere Gruppe von Erscheinungen, die sich an die schon von alters her bekannte Wahrnehmung knüpft, daß geriebener Bernstein leichte Gegenstände, Papierschnitzel, Holundermarkkügelchen, Metallspäne anzieht. Wir wissen, daß man nach dem Bernstein (Elektron) die ganze Gruppe von Erscheinungen die der elektrischen genannt hat. Aber die

eigentliche Reibungselektrizität, die jenem versteinerten Harz eigen ist, bildet heute nur eine verhältnismäßig kleine Untergruppe dieser wunderbaren Kraft, welche die moderne Technik beherrscht. Man nennt diese Reibungselektrizität im Gegensatze zu den elektrischen Strömen, die uns erst später beschäftigen werden, auch die **statische** (ruhende) **Elektrizität**.

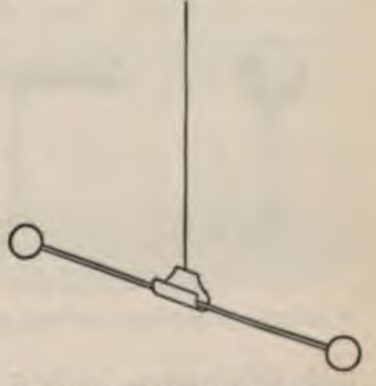
Nicht nur der Bernstein zeigt bei der Reibung die betreffenden Eigenschaften, sondern auch Gummi, Schwefel, Siegellack, dann Glas, Seide, Wolle u. s. w. Je nach der Auswahl der beiden aneinander zu reibenden Stoffe erzielen wir eine mehr oder weniger kräftig anziehende Wirkung. Hier springt bereits ein Unterschied mit dem Magnetismus in die Augen, der so stark nur bei dem Eisen in Erscheinung tritt. Ferner macht diese Kraft keinen wesentlichen Unterschied in den angezogenen Massen, denn eine geriebene Glasstange zieht nicht bloß wieder Glas (in sehr kleinen Mengen als Staub) an, wie das magnetische Eisen nur anderes Eisen. Wir sahen, daß gewöhnliches Eisen nur durch das Bestreichen mit schon vorher magnetischem Eisen magnetisch gemacht werden konnte, während zwei Körper, ohne daß der eine elektrisch war, allein durch Reibung elektrisch werden. Die elektrischen Körper verlieren ihre Eigenschaft aber meist schon nach wenigen Minuten, so daß sie dann aufs neue durch Reibung erregt werden müssen, während der magnetische Zustand des Eisens unter Umständen scheinbar völlig permanent wird.



Isogonen in Frankreich. Nach Mascart. Vgl. Text, S. 311.

Die Größe der so hervorgerufenen elektrischen Kraft messen wir durch die Drehwage, eine kleine Metallkugel, die durch eine Stange mit einem Gegengewicht verbunden und an einem Faden aufgehängt ist. Ihre Ablenkung durch die Nähe etwa einer erregten Glasstange bestimmt deren elektrische Kraft (s. die obere Abbildung, S. 313). Als Einheitsmaß wird auch hierbei wieder das sogenannte absolute gewählt, das Dyn, oder die Kraft, die der Masse eines Gramms die Beschleunigung von 1 cm in einer Sekunde erteilt.

Wie wohl von vornherein selbstverständlich war, sind auch bei der elektrischen Kraft Wirkung und Gegenwirkung gleich: wir können auch die geriebene Glasstange aufhängen und ihr eine Metallkugel nähern, dann wird die Glasstange um den gleichen Winkel abgelenkt, also scheinbar vom Metall angezogen.



Elektrische Drehwage. Vgl. Text, S. 312.

Von einem Magnet unterscheidet sich unser elektrischer Körper weiter wesentlich dadurch, daß er keine Pole hat. Er ist nur da elektrisch, wo er gerieben wurde, hier aber überall gleich. Wenn wir Eisen auch nur auf einer Seite mit einem Magnet bestreichen, wird dennoch die andere Seite entgegengesetzt magnetisch; in der Mitte aber bleibt es indifferent, wieviel Magnetismus wir ihm auch zuführen.

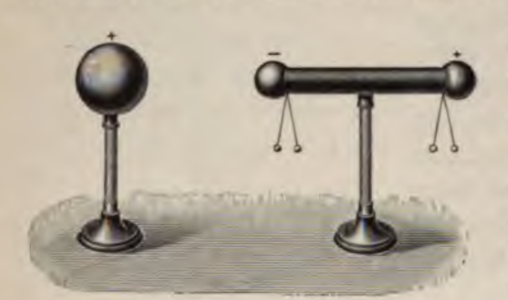
Dagegen entdecken wir bald an unseren elektrischen Körpern eine neue Eigenschaft, die eine offenbare Verwandtschaft mit jener magnetischen Polarität hat. Erregen wir zwei Glasstangen in der gleichen Weise und legen die eine auf die Drehwage, so wird sie von der anderen in unserer Hand abgestoßen. Aber nicht bei allen elektrisierten Körpern findet dies statt. Reiben wir z. B. eine Siegellackstange mit Wolle, so wird sie neben allen unelektrischen Körpern auch die elektrische Glasstange anziehen, dagegen eine erregte Siegellackstange gleichfalls abstoßen, wie es zwei elektrische Glasstangen tun. Ebenso wie man einen nordpolaren und einen südpolaren Magnetismus als getrennte Flüssigkeiten auffassen kann, so nahm man zwei verschiedene elektrische Flüssigkeiten an, die positive und die negative Elektrizität, eine Unterscheidung, die nach der atomistischen Reformation der Physik keine reale Bedeutung mehr hat. Aber diese Bezeichnungsweise ist so tief eingewurzelt und hat auch so viel Bequemlichkeiten für die Darstellungsform, daß man sich bisher nicht entschließen konnte, sie durch eine unseren modernen Anschauungen mehr entsprechende zu ersetzen. Wenn wir uns also auch hier derselben bedienen, so wolle man sich immer vor Augen halten, daß es sich nur um eine vereinfachte Ausdrucksweise handelt, wie wir auch sagen, die Sonne geht im Osten auf und im Westen unter, während wir doch wissen, daß sie still steht und wir uns im umgekehrten Sinne bewegen.



Goldblattelektroskop. Vgl. Text, S. 315.

Als positiv bezeichnen wir die vom geriebenen Glas erzeugte Elektrizität, negativ nennen wir die des Siegellacks. Je nachdem elektrisch erregte Körper einander anziehen oder abstoßen, bringt man sie in eine Reihe, die man die elektrostatische Spannungsreihe nennt. Eine solche ist z. B. die folgende: + Glas, Wolle, Seide, Holz, Metall, Bernstein, Hartgummi, Schwefel, Schellack, Siegellack —. Die Reihe beginnt mit dem am meisten positiv wirkenden und endet mit dem unter den angeführten am stärksten negativ wirkenden Stoff. Auch bei der Trennung der Elektrizitäten findet Wirkung und Gegenwirkung in gleicher Weise statt. Bei Reibung von Glas mit Seide werden

beide Stoffe elektrisch, das Glas positiv, die Seide negativ. Reiben wir dagegen eine Hartgummistange mit dieser Seide, so wird sie positiv elektrisch, weil Gummi in der Spannungsreihe mehr nach der negativen Seite hin steht. Wir haben hier eine mit dem Para- und Diamagnetismus verwandte Erscheinung vor uns. Positive und negative Elektrizität haften nicht den betreffenden Stoffen an, sondern sind nur relative Erscheinungen.



Elektrische Influenz. Vgl. Text, S. 315.

In unserer Spannungsreihe ist auch Metall angeführt. Nach seiner Stellung in ihr sollte man also annehmen, daß z. B. eine Messingstange, mit Wolle gerieben, negativ elektrisch werden müßte. Dies ist aber unter gewöhnlichen Umständen nicht der Fall. Kein Metall zeigt nach Reibung mit irgend welchen Stoffen elektrische Erscheinungen. In dieser Hinsicht ist für das Eisen der Unterschied zwischen Elektrizität und Magnetismus am auffälligsten. Aber da tritt eine ganz merkwürdige Beziehung zwischen den Metallen, allgemeiner zwischen den durch Reibung unter gewöhnlichen Umständen nicht elektrisch zu machenden Stoffen und den anderen hervor, die ganz besonders geeignet war, die Ansicht von elektrischen Flüssigkeiten zu unterstützen. Setzt man eine Metallkugel auf eine Glasstange, so daß sie nur durch diese auf dem Boden ruht, und peitscht nun die Kugel mit einem Fuchsschwanz, ohne sie mit den Fingern zu berühren, so wird auch sie elektrisch, und zwar negativ. Dieser Zustand verliert sich aber sofort wieder, wenn wir die Metallkugel mit dem Finger berühren oder durch einen Metalldraht mit der Erde in Verbindung bringen. Sie bleibt dagegen elektrisch bei Berührung mit einem Körper, den wir durch Reibung ohne weiteres elektrisch machen können, z. B. mit Glas, was schon die Versuchsanordnung beweist. Eine Glaskugel anderseits verliert ihre Elektrizität nicht durch solche Berührung oder Ableitung, oder doch nur an der Berührungsstelle. Man hat dies durch ein verschiedenes Leitungsvermögen der Stoffe für die früher angenommenen elektrischen Flüssigkeiten zu erklären versucht, und auch wir werden uns einstweilen diesen Anschauungen anschließen. Wir nehmen also an, alle Körper werden durch Reibung eigentlich gleich stark elektrisch, nur kann sich die elektrische Flüssigkeit in Glas, Seide, Bernstein, Siegellack u. s. w. nicht weiter ausdehnen und bleibt an den Stellen, wo sie erzeugt worden ist. Dagegen haben die Metalle die Fähigkeit, die Elektrizität sofort über ihre ganze Oberfläche zu verbreiten. Sie geht dann unter gewöhnlichen Umständen durch die den Metallstab haltende Hand in den menschlichen Körper und von diesem in die Erde über, die beide für


Abstoßung und Anziehung von Markkugeln durch Elektrizität. Vgl. Text, S. 316.

die Elektrizität leitend sind. Dadurch aber verschwindet für uns die Wirkung. Die Metalle sind elektrische Leiter, andere Stoffe sogenannte Isolatoren. Auf diesen bleibt die erzeugte Elektrizität ohne weiteres haften, auf den Leitern nur, wenn man sie durch einen Nichtleiter, Isolator, von dem alle Elektrizität verschluckenden Erdboden trennt. Unter solchen Vorsichtsmaßregeln verhalten sich die Metalle wie alle anderen Stoffe. Man kann auf ihnen beide Arten von Elektrizität hervorrufen oder durch Berührung übertragen und sagt im letzteren Falle, man ladet sie mit Elektrizität.

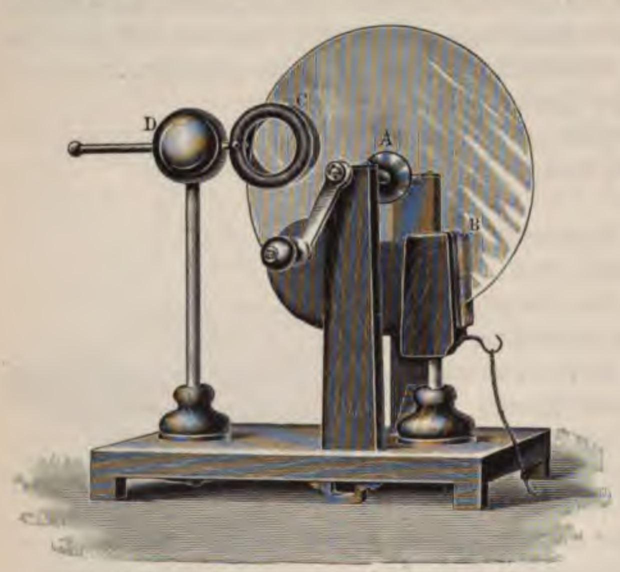
Zwei gleich geladene Metallstücke stoßen sich ab. Diese Erscheinung wird benutzt, um sehr kleine Mengen Elektrizität mit Hilfe des sogenannten Goldblattelektroskops nachzuweisen (s. die untere Abbildung, S. 313). In einer Hohlkugel aus Glas sind zwei kleine Blattgoldstreifen isoliert aufgehängt, die gemeinsam in metallischer Verbindung mit einer aus dem Glasgefäß hervorragenden kleinen Metallkugel stehen. Berührt man nun diese mit einem elektrischen Körper, so werden beide Goldblättchen gleichnamig geladen und stoßen einander ab, so daß sie auseinandergehen wie die Schenkel eines Winkels und erst nach kurzer Zeit langsam zurückfallen. Die Größe dieses Ausschlags gibt ein Maß für die zugeführte Elektrizitätsmenge.


Elektrophor. Vgl. Text, S. 317.

Eine isolierte Metallkugel, ein sogenannter Konduktor, wird mit Elektrizität geladen. Ihm nähern wir einen anderen länglichen Leiter, der ebenfalls isoliert ist, wie in der auf S. 314 oben abgebildeten Anordnung, und bemerken, daß dieser Körper, auch ohne den elektrischen zu berühren, selbst elektrisch wird, wie die sich abstoßenden Kügelchen an beiden Seiten beweisen. Aber der Konduktor zeigt an seinen beiden Enden verschiedene Eigenschaften. Ist die in die Nähe gebrachte Kugel positiv geladen, so wird das ihr zugewandte Ende des Konduktors negativ elektrisch, und nur die abgewandte Seite führt die gleichnamige Elektrizität mit der aus der Entfernung wirkenden Elektrizitätsquelle. Wird diese entfernt, so wird der Konduktor sofort wieder unelektrisch. Dies sind also genau dieselben Eigenschaften, die wir schon als magnetische Influenz kennen gelernt haben; wir bezeichnen sie deshalb als elektrische Influenz. Ein elektrisch influierter Körper hat demnach, im Gegensatze zu einem direkt erregten, der nur immer eine der beiden Elektrizitäten aufweist, in allen wesentlichen Punkten die Eigenschaften eines Magnets, der nicht nur auf Eisen, sondern auf alle Körper wirkt, aber freilich diese Eigenschaft bei der Berührung sofort verliert. Als ein weiterer Verwandtschaftszug kommt noch hinzu, daß die Wirkung sowohl der Elektrizität wie des Magnetismus mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, wie gleichfalls Coulomb nachwies.

Früher nahm man für die elektrische Influenz an, daß im Inneren jedes Körpers stets beide Arten von Elektrizität vereinigt und deshalb unwirksam seien. Da sich ungleichnamige Elektrizitäten anziehen, glaubte man, daß sie sich in dem Konduktor durch die Fernwirkung des geladenen Körpers trennen und sich polar anordnen. Es liegt hier nahe, an Stelle dieser Auffassung die von unseren magnetischen Wirbeln zu setzen; wir wollen indes vorher noch weitere Erfahrungen über diese wunderbaren Kraftäußerungen sammeln, ehe wir uns ein etwas klareres Bild von ihrem Wesen auf atomistischer Grundlage zu machen versuchen.

Durch die von Influenz hervorgerufene Spaltung der Elektrizitäten in einem Leiter wird die Anziehungskraft zwischen ihm und der Elektrizitätsquelle vermehrt. Wird es ihm ermöglicht, so eilt er mit beschleunigter Geschwindigkeit jener entgegen. Hat er nun aber den nur mit einer Elektrizitätsart geladenen Körper erreicht, so geht infolge seines Leitungsvermögens die Elektrizitätsart des anderen Körpers auf ihn über: er ist nun gleichnamig geladen und wird deshalb abgestoßen. Wenn er dabei zur Erde fällt oder auf einen mit der Erde verbundenen leitenden Körper, so verliert er seine Elektrizität wieder; der isolierte elektrische Körper wirkt abermals auf ihn anziehend, nach abermaliger Berührung abstoßend und so fort. Man benutzt diese Wechselwirkung zu einem der vielen elektrischen Spielzeuge. In einem oben und unten durch metallische Deckel verschlossenen Glaszylinder befindet sich eine Anzahl leichter Kügelchen. Hält man das Gefäß mit dem unteren Deckel in der Hand, so daß der obere isoliert bleibt, und ladet diesen elektrisch, so führen die Kügelchen einen lebhaften Tanz zwischen dem oberen und unteren Deckel aus, der so lange andauert, bis alle Elektrizität von ihnen nach dem unteren Deckel getragen und dadurch zur Erde abgeleitet ist (s. die untere Abbildung, S. 314).

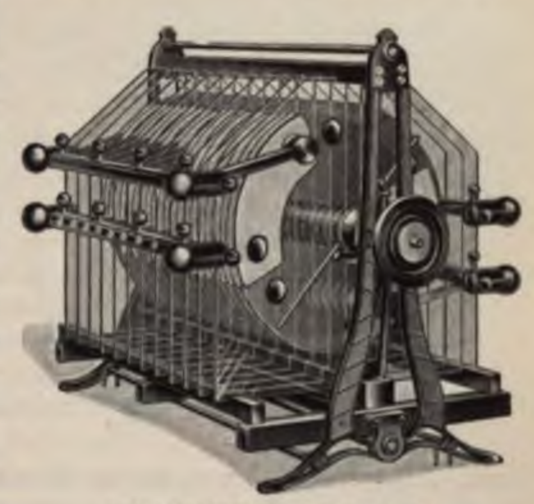


Reibungselektrisiermaschine. Vgl. Text, S. 317.

Auch die Begriffe des elektrischen Leitungs- oder Isolationsvermögens sind relativ zu nehmen. Es gibt nur bessere oder schlechtere elektrische Leiter. Daraus, daß jeder elektrische Zustand sich allmählich verliert, können wir ohne weiteres schließen, daß die Luft wohl ein ziemlich großes, aber doch kein vollkommenes Isolationsvermögen hat. Sie ist ein schlechter Leiter. Wäre sie das nicht, so würden wir überhaupt keine elektrischen Erscheinungen wahrnehmen können, weil die Luft dann jede getrennte Elektrizitätsmenge sofort wieder in das große Reservoir des Erdkörpers ableiten würde. Langsam geschieht dies indes doch, da wir die Blättchen des Elektroskops auch ohne Berührung allmählich wieder zusammenfallen sehen. Das Isolationsvermögen, ebenso wie das der Leitung, kann aber auch in ein und demselben Körper sehr bedeutend schwanken. So ist erwärmte Luft wieder recht gut leitend. Wir brauchen das geladene Elektroskop nur über eine Flamme zu halten, um es sofort zu entladen. Ebenso ist verdünnte Luft leitend bis zu einem gewissen Grade der Verdünnung, das Vakuum aber ist wieder nicht leitend. Gewöhnliches Wasser ist ein guter Leiter; befreit man es dagegen sorgfältig von jeder fremden Beimischung, so leitet es schlecht. Hier schon tritt eine Fülle von Erscheinungen auf, zu deren Erklärung uns zunächst noch der Faden fehlt.

Unsere bisherigen Erfahrungen geben uns die Mittel an die Hand, Apparate zu bauen, mit denen wir uns größere Mengen von Elektrizität verschaffen können, als es durch Reibung

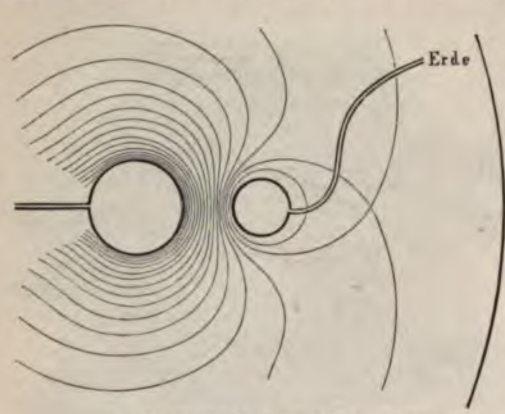
in der Hand möglich ist. Eine der ältesten Formen eines solchen Elektrizitätserzeugers ist der sogenannte **elektrische Kuchen** oder **Elektrophor** (s. die Abbildung, S. 315). Er besteht aus einer Harzmasse, die in einer metallenen Form wie ein Kuchen flach ausgebreitet ist. Der Kuchen ist wieder von einem metallenen Deckel, Schild, bedeckt, der die Form, die Armatur, nicht berührt und an seidenen Fäden von dem Kuchen abgehoben werden kann. Durch Peitschen mit einem Fuchsschwanz wird der Kuchen negativ elektrisch gemacht. Dann wird die Armatur durch Influenz positiv elektrisch, während ihre negative Elektrizität durch die Berührung mit der Erde abgeleitet wird. Da nun die beiden ungleichnamigen Elektrizitäten des Kuchens und der Armatur sich gegenseitig festzuhalten suchen, wird man durch Berührung des Kuchens mit einem Leiter nur verhältnismäßig wenig Elektrizität frei machen können; dies ist aber auch der Grund, weshalb davon nur wenig in die Luft entweicht, der Elektrophor also sehr lange geladen bleibt. Legt man nun den Schild auf den Kuchen, so wird auch dadurch nur wenig Elektrizität direkt auf den ersteren übergehen, denn es sind wirkliche Berührungsstellen zwischen zwei nicht mit besonderer Sorgfalt aufeinander geschliffenen Flächen wenig vorhanden. Dagegen wird nun der Schild durch Influenz elektrisch. Eine Berührung mit dem Finger, während er auf dem Kuchen liegt, leitet seine oben angesammelte negative Elektrizität ab, und wenn wir ihn nun an den isolierenden Fäden vom Kuchen abheben, zeigt er sich positiv geladen. Die Ladung können wir auf einen anderen Konduktor übertragen und das Experiment immerfort wiederholen; denn die Ladung des Schildes geschieht nicht durch Ableitung, und der Kuchen gibt außerdem nur wenig Elektrizität an die Luft ab, es bleibt also die Ladung des Elektrophors lange Zeit fast unverändert.


Influenzmaschine. Vgl. Text, S. 318.


Oberflächenkonduktor. Vgl. Text, S. 318.

Eine fortdauernde Wiedererzeugung der verloren gegangenen oder benutzten Elektrizität kann man durch andauernde Reibung erzielen, am praktischsten durch eine Glasscheibe, die wir bei fortgesetzter Drehung um ihre Achse gegen ein Lederkissen streichen lassen. So entsteht die **Reibungselektrisiermaschine** (s. die Abbildung, S. 316). Die erzeugte Ladung der Glasscheibe A läßt man auf der dem Kissen B gegenüberstehenden Seite auf einen Spitzenkamm C überströmen, der die Scheibe nahezu berührt und die Elektrizität von hier in den isolierten Konduktor D leitet. Aus gleichen Gründen wie beim Elektrophor muß das Kissen nach der Erde abgeleitet werden. Etwas verwickelter ist die Wirkungsweise der sogenannten **Influenzmaschine**, bei der man eine schon

von vornherein vorhandene, zunächst sehr kleine Elektrizitätsmenge zu einer Influenzwirkung benutzt, von der nur ein Teil zum Konduktor gelangt, während der andere Teil zu einer kräftigeren Ladung der Maschine dient. Es entsteht so bei jeder Umdrehung eine multiplizierende Wirkung, die sehr hoch gesteigert werden kann. Die fast immer in der Luft vorhandene Elektrizität genügt in den meisten Fällen zu der ersten Ladung der Maschine. Merkwürdig ist, daß bei ihr nirgends eine Reibung ausgeübt wird; es rotiert nur eine Glasscheibe vor einer anderen feststehenden. Dennoch bemerkt man, sobald die sich mehr und mehr erregende Maschine beginnt, größere Elektrizitätsmengen abzugeben, daß die rotierende Scheibe einen großen Widerstand findet, als riebe sie sich in der Tat an etwas. Dieser Widerstand rührt von den sich gegenseitig anziehenden Elektrizitäten der beiden Glasscheiben her. Auf S. 317 oben haben wir eine solche Influenzmaschine abgebildet, bei der eine ganze Batterie von rotierenden Scheiben zugleich wirkt.



Potentiallinien. Vgl. Text, S. 320.

Mit solchen Hilfsmitteln kann man verhältnismäßig große Mengen statischer Elektrizität sammeln und ihre Wirkungen besser studieren. Wir leiten die Verbindung mit dem Reibkissen, allgemeiner mit der dem ersten Konduktor entgegengesetzten Elektrizitätsquelle, in einen zweiten Konduktor ab, dann liefert die Maschine zugleich beide Arten der Elektrizität.

Untersuchen wir nun einen solchen stark geladenen Konduktor genauer, so zeigt es sich, daß die noch so kräftige Ladung sich nur auf seiner Oberfläche vorfindet, und zwar nimmt nicht etwa die elektrische Kraft allmählich nach dem Mittelpunkt einer gleichmäßig mit Masse erfüllten Kugel ab, wie wir es z. B. bei der Schwerkraft unserer Erde wahrnehmen, sondern es ist wirklich nur die äußerste Oberflächenschicht elektrisch. Die untere Abbildung auf S. 317 erläutert dies. Die mittlere Kugel war von den beiden seitlichen Halbkugeln umhüllt, während man das Ganze mit Elektrizität lud. Als nun die Halbkugeln zur Seite geschoben wurden, zeigten nur sie sich elektrisch, nicht die innere Kugel. Deshalb nutzt es nichts, wenn wir die Konduktoren aus Vollkugeln herstellen; eine gleichgroße Hohlkugel hat eine genau ebenso große Aufnahmefähigkeit für die ihr zugeleitete Elektrizität. Wir verstehen dies sofort bei der Erwägung, daß ja die gleichnamigen Elektrizitäten sich abstoßen. In dem geladenen Konduktor befindet sich aber nur gleichnamige Elektrizität. Denken wir uns ihn zunächst von kleinsten beweglichen Teilen jener elektrischen Flüssigkeit erfüllt, so suchen diese unter den gegebenen Umständen sich voneinander so weit, als es geht, zu entfernen. Die größte Kugeloberfläche aber bietet ihnen diese Möglichkeit des



Konduktor mit Spitze im homogenen Feld. Vgl. Text, S. 320.

größten gegenseitigen Abstandes. Sie drängen also von innen nach außen hin, bis sie an die isolierende Luft gelangen, die eine weitere Ausbreitung verhindert.

Es ergibt sich zugleich aus dieser Betrachtung, daß die Elektrizität sich in einem Zustande der Spannung auf der Konduktoroberfläche befinden muß, denn die sich weiter abstoßenden kleinsten Teilchen trachten diese zu verlassen und werden nur durch die Luft daran verhindert. Wir können den Zustand etwa so veranschaulichen, daß wir uns die Oberfläche des Konduktors aus einer großen Anzahl ganz kleiner nebeneinander liegender Spiralfedern zusammengesetzt denken, die sich im einzelnen gegenseitig an der weiteren Ausdehnung hindern, während diese ihnen möglich wird, wenn sie gemeinsam in eine größere Kugeloberfläche hinaufrücken. Dies kann innerhalb des Konduktors geschehen, die Luft aber bietet ihnen ein Hindernis, das nur sehr langsam zu überwinden ist. Die gesamte Kugeloberfläche wirkt deshalb wie eine gespannte Feder gegen einen Widerstand, und diese Spannung findet nur zum geringsten Teil unter den Molekülen der metallischen Oberfläche selbst, im wesentlichen dagegen unter den zwischenliegenden Ätherteilchen statt. Die durch diese Spannung hervorgebrachten elektrischen Wirkungen verbreiten sich demnach auch überall dahin weiter über die Oberfläche des Konduktors hinaus, wohin dieser Äther dringen kann. Wir begreifen, daß das Maß der hierdurch entstehenden scheinbaren Fernwirkung durch die molekulare Beschaffenheit des Zwischenmediums bestimmt wird, auf dessen verschiedener Durchdringbarkeit dann der Wirkungsunterschied zwischen Leitern und Isolatoren beruht. Auf diese sehr interessanten Beziehungen kommen wir noch im besonderen zurück.



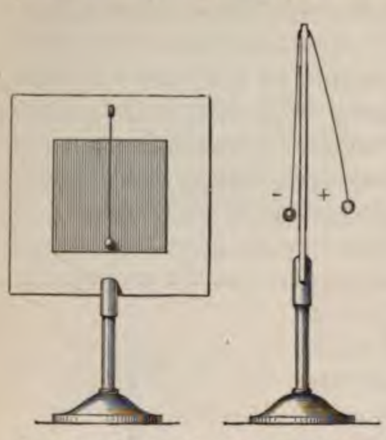
Elektrische Spitzenwirkung. Vgl. Text, S. 321.

Das Bild der Spiralfedern zur Veranschaulichung der elektrischen Oberflächenspannung weist uns sofort wieder zur eigentlichen Erklärung der elektrischen Erscheinungen auf jene Ätherwirbel hin, die uns außer dem Magnetismus auch noch manche andere Naturerscheinung verständlich machten. Wir wollen indes auch hier noch nicht näher darauf eingehen, sondern die Erklärung der Abstoßung gleichnamiger Elektrizitäten einstweilen noch offen lassen. Wird aber allein diese erklärungsbedürftige Tatsache als solche hingenommen, so gelingt es, von ihr aus alle Erscheinungen der statischen Elektrizität nur aus den entstehenden Spannungsverhältnissen mathematisch abzuleiten.

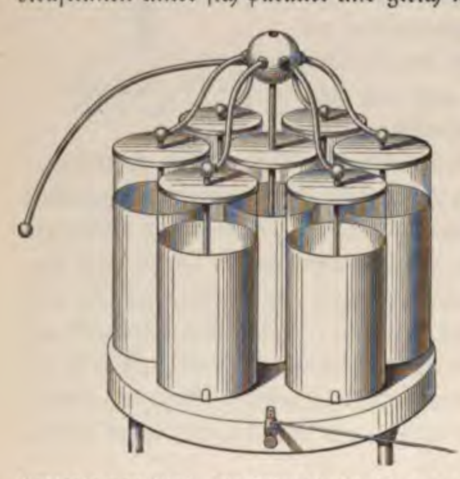
Die Physiker, welche, wie die meisten Gelehrten, sich in Anbetracht des immer mehr hervortretenden internationalen Charakters der Wissenschaft bemühen, möglichst allgemein verständliche Begriffsworte einzuführen, aber darin unserer Ansicht nach in Deutschland doch oft ein wenig zu weit gehen, haben für das gute deutsche Wort Spannung für diesen Begriff im physikalisch-mathematischen Sinne das Fremdwort Potential eingeführt. Auch wir können uns hier diesem Gebrauche nicht mehr entziehen und müssen uns mit dem elektrischen Potential beschäftigen.

Man spricht von Potentialflächen, wie man von den uns schon bekannten Kraftlinien spricht, und beide stehen in einem ganz bestimmten Verhältnis zueinander. Wir können die im Äther wirkenden Kräfte als Spannungen ausdrücken. Wo die Spannung am größten ist, da ist es auch die Kraft, welche die Spannung verursachte. Bewegen wir uns längs einer Kraftlinie, so nimmt in ihr die sie bildende Kraft beständig zu oder ab. Deshalb bewegen sich ja die

Körper in den Kraftlinien. Potentialflächen entstehen nun durch die Verbindung derjenigen Punkte benachbarter Kraftlinien, in denen die Kraft selbst überall die gleiche ist; sie sind also Flächen gleicher Spannung und müssen ihrer Definition entsprechend auf den Kraftlinien überall normal stehen. Drücken wir die Kraft und ihre Abnahme in bestimmten gleichen Einheiten aus und zeichnen für jede Einheit oder ein bestimmtes Vielfaches derselben eine Potentialfläche, so müssen sich diese da am meisten zusammendrängen, wo auch die Kraft am größten ist. Man sagt, hier herrscht das größere Potentialgefälle. So kann man z. B. die Linien gleichen Barometerstandes auf den bekannten Karten für die Wetterprognosen, die Isobaren, als Teile von Potentialflächen auffassen. Wo sie sich um ein Minimum am stärksten zusammendrängen, da herrscht das größte Potentialgefälle, dort im Zentrum des Luftwirbels erreicht der Wind deshalb seine größte Kraft. Auf S. 318 oben haben wir die Querschnitte von Potentialflächen um einen elektrischen Konduktor abgebildet, dem eine andere zur Erde abgeleitete Kugel gegenübersteht. Wir sehen, wie die Linien um den Konduktor von der anderen Kugel zwischen beiden zusammengedrückt werden, wie die kleinere Kugel nur eine ihr allein angehörende Potentiallinie hat, daß ferner eine beiden angehörende Linie sich selbst durchkreuzt und schließlich in weiterer Entfernung die Linien des Konduktors diesen wieder ungestört umgeben. Das ganze Gebiet, in welchem man durch die Beobachtung noch solche Linien nachweisen kann, heißt das elektrische Feld. Liegen in einem Felde die Potentialflächen und deshalb auch die Kraftlinien unter sich parallel und gleich weit voneinander entfernt, so hat man es mit einem sogenannten homogenen Felde zu tun. Aus jenen allgemein mechanischen Gründen, die überall in der Natur den Ausgleich herbeizuführen streben, sucht ein aus irgend welchen Gründen gestörtes elektrisches Feld wieder zu einem homogenen zu werden. Deshalb muß das Studium der Potentialflächen ohne weiteres alles Nötige über die zu erwartende Kraftwirkung aussagen können, und hierin liegt der praktische Wert der Einführung dieses Anschauungshilfsmittels für das Studium. Bringen wir z. B. eine mit einer Spitze versehene leitende Kugel in ein homogenes Feld, so bilden sich die S. 318 unten dargestellten Linien als Querschnitte für die Potentialflächen. Vorher parallel biegen sie sich nun um die Kugel herum und drängen sich unter ihr zusammen, während die Spitze sie fast gar nicht abzulenken vermag. Die Potentiallinien, wie wir den Querschnitt durch die Flächen kurz nennen wollen, werden auseinandergezogen wie elastische Bänder. Dadurch, daß sie wieder ihre vorige Lage anzunehmen trachten, drücken sie die Kugel in der Richtung ihrer Spitze



Franklinsche Tafel. Vgl. Text, S. 321.


Batterie von Rieß, aus Leidener Flaschen zusammengesetzt. Vgl. Text, S. 321.

Verbindung steht. Eine Anzahl solcher Flaschen kann man zu einer **Batterie** vereinigen (s. die untere Abbildung, S. 320).

Durch eine derartige Anordnung ruft man sehr große Spannungen hervor, die unter Umständen Hunderttausende von Volt betragen. Stellt man mit Hilfe eines **Entladers** (s. die Abbildung, S. 321), der den gefährlich werdenden **Entladungsstrom** vom menschlichen Körper abhält, die Verbindung des inneren mit dem äußeren Belage her, so geschieht der Ausgleich unter der Erscheinung eines kräftigen **Funkens**, der zugleich auch eine plötzliche knallende **Lufterschütterung** hervorruft. Wie die plötzliche Zusammenziehung eines elastischen Bandes, einer Feder oder der verdünnten Luft Wärme hervorbringt, so wird auch

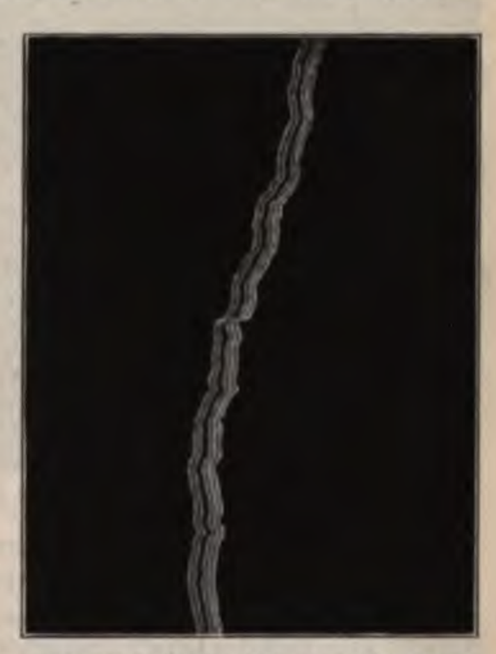


Vielfach geteilter Blitzschlag. Nach Photographie von Mc. Adie.

durch diesen Ausgleich elektrischer Spannungen Wärme erzeugt, die sich plötzlich längs des Gebietes stärksten Potentialgefälles auf einen verhältnismäßig kleinen Raum verteilt und deshalb eine sehr bedeutende Wirkung ausübt. Die Luft wird auf der **Funkenstrecke** bis zum Glühen erhitzt, und Teile des Metalles, von dem die Elektrizität entströmt, werden gleichfalls im glühenden Zustand mitgerissen. Hierdurch allein entsteht der elektrische Funke, wie sein Spektrum beweist, das keine anderen Linien als die des betreffenden Metalldampfes und der Luft enthält. Die erhitzte Luft wird durch die plötzliche Ausdehnung erschüttert und ruft dadurch die begleitenden Schallerscheinungen hervor.

Der **Blitz** ist durchaus nichts anderes als ein solcher elektrischer Funke von ungeheurer Größe (s. die obenstehende Abbildung). Wie die zu seiner Erzeugung nötigen elektrischen Spannungen in der Atmosphäre entstehen, kann uns hier nicht beschäftigen. Diese Funken, die sich zwischen den Gewitterwolken oder zwischen diesen und der Erdoberfläche entladen, haben oft Längen von mehreren Meilen, während die größten Funken, die wir aus unseren elektrischen

Apparaten ziehen, nur selten 1 m erreichen. In den Gewitterwolken müssen sich also ungeheure Spannungen sammeln, und die Entladung kann sich häufig gar nicht auf einmal vollziehen. Es folgen einander in der gleichen Bahn eine ganze Anzahl von Blitzen, wie photographische Aufnahmen beweisen, die oft 10—15 m breite, parallel nebeneinander herlaufende Lichtstreifen erkennen lassen (s. die untenstehende Abbildung). Auch merkt man die Wiederholung der Entladung an der größeren Dauer dieser Blitze, die zuweilen merkliche Bruchteile einer Sekunde betragen, während bekanntlich ein einzelner Blitz so schnell vorüberzugehen pflegt, daß die Räder eines schnellfahrenden Wagens, die wir nur durch die Blitzbeleuchtung wahrnehmen, still zu stehen scheinen. Die Schnelligkeit des Blitzes ist ja sprichwörtlich, und man mag sich deshalb darüber wundern, wenn man solche beobachtet, die zweifellos eine meßbare Zeit andauern.



Photographie eines Bandblitzes. Nach G. A. L. Münker.

Die Blitze haben nicht immer die bekannte Zickzackform. Man sieht oft eine ganze Wolke aufleuchten, ohne daß ein Blitz sich aus ihr entwickelt. Hier treten offenbar sogenannte **Glimmentladungen** ein, die wir noch näher kennen lernen werden. Sehr merkwürdig sind ferner die **Kugelblitze**, die man lange ins Fabelreich verwiesen hatte. Während eines Gewitters treten zwar sehr selten, aber doch sicher beobachtet, nahe an der Erdoberfläche, zwischen Bäumen oder Häusern fast greifbare, kugelförmige, leuchtende Wolkengebilde auf, die in lebhafter Rotation zu sein scheinen und ein zischendes, prasselndes Geräusch von sich geben. Sie bewegen sich verhältnismäßig langsam, verändern häufig ihre Richtung zwischen den Gegenständen der Umgebung und zerplatzen, meist ohne besonderen Schaden anzurichten und ohne eine Spur zurückzulassen. Die Entstehungsweise dieser Kugelblitze ist noch recht geheimnisvoll. Es scheint, daß man es in ihnen mit elektrischen Wirbeln im großen Maßstabe zu tun hat, wie wir sie uns um einen starken Magnet bestehend denken.

Aus dem Vorangegangenen verstehen wir die schützende Wirkung der **Blitzableiter**. Die zertrümmernde oder zündende Gewalt der Blitzschläge rührt daher, daß der Entladungsstrom oft nur sehr schlechte Leiter benutzen kann, in denen er eine große Hitze und dadurch Explosionen hervorruft, die Bäume zersplittert, wenn der Blitz die im Holz enthaltene Feuchtigkeit plötzlich in Dampf verwandelt. In einem Leiter dagegen entwickelt der elektrische Strom bedeutend weniger Wärme; er wählt außerdem diesen lieber zu seiner Entladung, die auf diese Weise meist unschädlich gemacht wird. Außerdem wirken die Blitzableiter auch vorbeugend. Wir haben schon vorhin gesehen (S. 321), daß die Elektrizität aus Spitzen leichter entweicht als aus Körpern von rundlicher Oberfläche. Beim Gewitter ist nun nicht nur die Wolke, sondern auch ebenso die Erdoberfläche mit der entgegengesetzten Elektrizität stark geladen. Der Blitz wird an der Stelle überschlagen, wo die größten Elektrizitätsmengen einander gegenüberstehen.

Durch jene Spitzenwirkung entweicht aber bereits vor dem Eintritte der größten Spannung aus dem Teile der Erdoberfläche, mit welchem der Blitzableiter in leitender Verbindung steht, eine beträchtliche Menge, ohne zu schaden, und vermindert an dem Orte das elektrische Potential. Entweder wählt deshalb der Blitz diesen Weg gar nicht, oder seine Kraft ist doch geschwächt.

Bei nächtlichen Gewittern beobachtet man zuweilen diese Spitzenwirkung in besonders reizvoller Weise. Die aus dem Erdboden durch die Blitzableiter oder andere spitze Körper, selbst aus Bäumen oder Bergspitzen entweichende Elektrizität wird als bläulich oder auch manchmal rötlich leuchtendes Lichtbüschel sichtbar, das man Elmsfeuer nennt. Oft tritt diese märchenhafte Erscheinung bei völlig klarem Himmel, namentlich in den Bergen auf. Die Luft ist immer von Elektrizität erfüllt, deren Spannung fällt und steigt. Ihr Ausgleich mit dem Erdboden kann deshalb, namentlich in der dünneren Luft der Berghöhen, durch Spitzenwirkung geschehen, auch wenn die Spannung sich vorher nicht zu einem Gewitter verdichtet hatte, zu dessen Entstehen ja noch andere Bedingungen erforderlich sind, als nur das Vorhandensein getrennter Elektrizitäten in der Luft und dem Erdboden. Unsere Abbildung zeigt die Erscheinung eines Elmsfeuers, das am Observatorium auf dem Sonnblick beobachtet wurde.



Elmsfeuer auf dem Sonnblick. Nach photographischer Aufnahme.

Wir wissen, daß der Blitz mit außerordentlicher Geschwindigkeit seine oft meilenlange Bahn durchläuft. Ist aber diese Zeit nicht doch irgendwie meßbar? Allgemeiner: Welche Dauer hat ein elektrischer Entladungsstrom? Man kann hierüber Experimente anstellen, indem man einen Entladungsstrom über mehrfache Unterbrechungen hinwegspringen läßt, so daß er an verschiedenen Stellen Funken bildet. Läßt man den Strom zwischen zwei Funkenstrecken durch einen Draht einen langen Weg durchlaufen, so müssen die beiden Funken zu verschiedenen Zeiten auftreten, wenn der Entladungsstrom eine meßbare Zeit zu seiner Ausbreitung bedarf. Ohne weiteres erscheinen nun die Funken gleichzeitig. Wendet man aber wieder, wie zu den Versuchen über die Geschwindigkeit des Lichtes, einen sehr schnell um seine Achse drehbaren Spiegel an, der die Zeit zwischen dem Auftreten der beiden Funken als einen Drehungswinkel jenes Spiegels erscheinen läßt, so ergibt sich die ungemein merkwürdige Tatsache, daß die Elektrizität genau dieselbe Zeit zu ihrer Ausbreitung braucht wie das Licht. Es muß also ein innerer Zusammenhang zwischen diesen beiden so verschiedenartig auftretenden Erscheinungen

bestehen. Wir wollen dies im folgenden scharf ins Auge fassen, ohne jedoch jetzt schon Betrachtungen hieran zu knüpfen.

Auch die verhältnismäßig so kleinen Blitze, die wir künstlich erzeugen, üben schon recht erhebliche zerstörende Wirkungen aus. Unsere elektrischen Funken schlagen Löcher durch ziemlich dicke Glasplatten, zersplittern und entzünden Holz und rauben uns auf dem Wege durch unseren Körper wohl selbst das Leben wie ein wirklicher Blitz.

Die Funkenlänge hängt bei gleicher Form der Konduktoren, zwischen denen die Funken überspringen, offenbar von der Spannung ab, die zwischen beiden herrscht, und kann deshalb auch als Maß der Spannung benutzt werden. Es ergibt sich z. B., daß in Luft zwischen zwei Konduktorkugeln von 1 cm Durchmesser ein winziger Funke von 0,1 mm Länge erst überspringt, wenn die Kugeln mit etwa 1000 Volt Spannung geladen sind. Zu einem Funken von 1 mm gehören schon beinahe 5000 Volt, zu einem solchen von 8 mm 25,000 Volt. Wieviel Volt mögen wohl einen Blitzstrahl hervorrufen?

Es ist interessant, zu erwähnen, daß die Entladungen der beiden ungleichen Elektrizitäten verschiedenartige Funken bilden. Läßt man Funken auf eine Glasscheibe überspringen, die in besonderer Weise präpariert ist, so daß von der sich ausbreitenden Elektrizität ein bleibendes Bild geschaffen wird, so zeigt die positive Elektrizität strahlenförmige Verästelungen, die sogenannten Lichtenbergschen Figuren (s. die untenstehende Abbildung); die negativen Entladungen bilden dagegen nur unregelmäßige Flecke oder wolkenartige Verdichtungen auf der Platte. Fließt der Entladungsstrom nur in einer Richtung, so daß die beobachteten Verschiedenheiten in ähnlicher Weise zu erklären sind, wie wir die Polarität des Magnetismus durch nur eine Stromrichtung des magnetischen Wirbels uns veranschaulichten, so müssen verschiedene Eigenschaften der Entladungen sich zeigen. Wir kommen auf andere, sehr wesentliche Unterschiede der positiven und der negativen Entladung zurück.



Lichtenbergsche Figuren.

Von der Fortpflanzungsdauer des Entladungsstromes in einem Leiter unterscheidet sich sehr wesentlich die Dauer des Entladungsfunkens selbst, die bedeutend größer ist. Man konnte sie gleichfalls mit Hilfe eines rotierenden Spiegels bestimmen und erhielt zwischen einer kurzen Funkenstrecke für sie immerhin 42 Millionenteile einer Sekunde. In einer ganzen Sekunde würde also diese Strecke von vielleicht kaum 1 cm 42millionenmal durchlaufen. Das macht nur wenige 100 km aus gegen die 300,000 der Lichtgeschwindigkeit, mit der die des Entladungsstromes übereinstimmt. Das Bild des Funkens, welches man hierbei in dem schnell umschwingenden Spiegel sah, gibt die Erklärung für diesen auffallenden Unterschied. Es zeigt sich in eigentümlicher Weise in die Länge gezogen (s. die oberen Abbildungen, S. 326). Die Entladungen gehen schichtweise hintereinander vor sich, woraus wir in Verbindung mit anderen Wahrnehmungen schließen müssen, daß die sich ausgleichenden Elektrizitäten erst verschiedene Male oszillierend zwischen den beiden Belägen hin und her fließen, daß also die erste Entladung zunächst

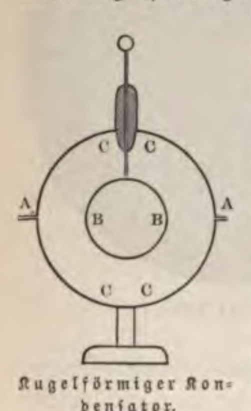
eine entgegengesetzte Ladung hervorruft, diese eine weitere und so fort, ebenso, wie ja auch eine plötzlich von ihrer Spannung befreite Feder eine Weile hin und zurück schwingt. Noch eine andere Eigenschaft der Entladungen hoher elektrischer Spannungen stimmt mit denen einer Feder überein. Eine solche kehrt, wenn sie nach starker Anspannung plötzlich entlastet wird, nicht unmittelbar wieder in ihren ursprünglichen Ruhezustand zurück. Hält man sie in der Lage, auf welche sie zurückgeschnellt ist, eine Weile fest, so sammelt sich aufs neue eine kleine Spannung an, und es bleibt ein Rückstand, der erst nach einiger Zeit sich gleichfalls frei macht. Ebenso zeigt sich nach vorheriger starker Spannung eine vollständig entladene Leidener Flasche kurze Zeit darauf wieder schwach geladen; man kann ihr wieder einen kleinen Funken entziehen, und auch wohl noch einen dritten und vierten.



Photographie oszillierender Funken. Vgl. Text, S. 325.

Für die Erkenntnis des inneren Wesens der Elektrizität ist es von großer Wichtigkeit, die Beziehungen der Leiter zu den Isolatoren noch näher zu untersuchen. Nachdem wir gesehen haben, daß man auch die Leiter durch Reibung elektrisch machen kann, wenn man sie nur dabei isoliert, so mochte es scheinen, daß ein wesentlicher Unterschied zwischen ihnen und den Isolatoren nicht vorhanden sei. Dagegen muß es uns auffallen, daß die von einem Elektrizitätsreservoir gewissermaßen ausstrahlende elektrische Kraft die Isolatoren fast ungehindert durchdringt, während die Leiter eine Schirmwirkung ausüben. Man nennt deshalb die Isolatoren auch Dielektrika. Sie sind durchlässig, durchsichtig für die elektrische Kraft, die Leiter dagegen undurchsichtig. Die elektrischen Erscheinungen, welche sie hervorbringen, sind als Rückstrahlungen aufzufassen. Da wir uns vorgenommen haben, auf die Parallelen zwischen Licht und Elektrizität besonders zu achten, ist es für uns von Interesse, die Eigenschaften dieser elektrischen Durchlässigkeit näher kennen zu lernen.

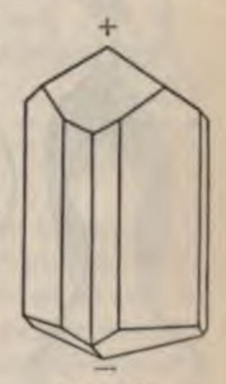
Wieder war es Faraday, der hierüber die grundlegenden Versuche anstellte. Er baute einen kugelförmigen Kondensator so, daß zwischen den beiden konzentrischen Kugeln A und B sich die isolierende Schicht C befand (s. die nebenstehende Abbildung). Er lud nun den Kondensator mit einer bestimmten Elektrizitätsmenge und benutzte das eine Mal Luft als Isolator, ein andermal füllte er die eine Hälfte des Innenraumes zwischen den beiden Hohlkugeln mit einem anderen Isolator, z. B. Schwefel, aus. Dabei zeigte sich, daß die elektrische Wirkung des Kondensators bei Anwendung verschiedener Isolatoren eine andere ist. Man hat, um diese Wirkung zahlenmäßig zu bestimmen, eine dielektrische Konstante eingeführt, die, wenn wir das Licht als Parallele heranziehen, mit dem Brechungsverhältnis zu vergleichen ist, das ja auch in bestimmter Weise von der molekularen Durchlässigkeit der betreffenden Stoffe für das Licht abhängt. Nun zeigt sich aus den Beobachtungen, daß diese dielektrische Konstante K genau gleich dem Quadrat des Lichtbrechungsverhältnisses n für jeden der untersuchten Stoffe ist. Wir haben hier wieder einen streng zahlenmäßig nachgewiesenen Zusammenhang zwischen den beiden Wirkungen, die scheinbar so verschieden sind, und müssen jedenfalls hieraus die Überzeugung schöpfen, daß die



Kugelförmiger Kondensator.

molekulare Beschaffenheit der Isolatoren sowohl auf die Lichtwirkungen wie auf die elektrischen den gleichen Einfluß üben. Schon im Lichtkapitel haben wir auf S. 223—225 einen mathematischen Ausdruck für die sogenannte Molekularrefraktion gegeben, die unabhängig von Druck und Temperatur, also vom Abstand der Moleküle untereinander ist. Dementsprechend finden wir auch, daß der Wert $R = \frac{1}{d} \cdot \frac{K-1}{K+2}$, wobei d die Dichtigkeit des betreffenden Stoffes ist, eine nur vom inneren Bau der Moleküle abhängige Konstante darstellt. Theoretische Betrachtungen zeigen ferner, daß sich aus diesem mathematischen Ausdruck das Verhältnis der Größe der Moleküle zu dem Zwischenraum, den sie unter sich lassen, bestimmen läßt und gleich $\frac{(K-1)}{(K+2)}$ sein muß.

Nach allem kann kein Zweifel darüber sein, daß die elektrischen Erscheinungen im wesentlichen von den Isolatoren abhängig sind. Ein weiterer Versuch zeigt dies in sehr anschaulicher Weise. Wir richten eine Franklinsche Tafel so ein, daß wir die beiden metallischen Beläge von der isolierenden Schicht abheben können. Tun wir dies im geladenen Zustande des Kondensators und entladen dann die Platten vollständig, so zeigt sich doch, daß sie von neuem geladen sind, sobald wir sie wieder an die isolierende Schicht legen. Die Elektrizität haftete also am Isolator, der allein, aber nicht der Leiter, der dauernde Träger der Kraft blieb. Eine genauere Verfolgung der betreffenden Erscheinungen überzeugt uns mehr und mehr, daß die elektrische Kraft Ursprung und Sitz in den Isolatoren hat, oder eigentlich nur im Äther, der alle diese Stoffe, soweit sie für ihn durchsichtig sind, durchdringt. Diese Durchsichtigkeit ist für die Leiter geringer als für die Isolatoren. Es bildet sich um diese eine Ätherschicht, die dann der Sitz der scheinbar von ihrer Oberfläche ausgehenden elektrischen Erscheinungen ist. Danach ist also ein geladener Konduktor überhaupt nicht elektrisch, sondern nur die Ätherhülle, die er festhält.



Turmalin.

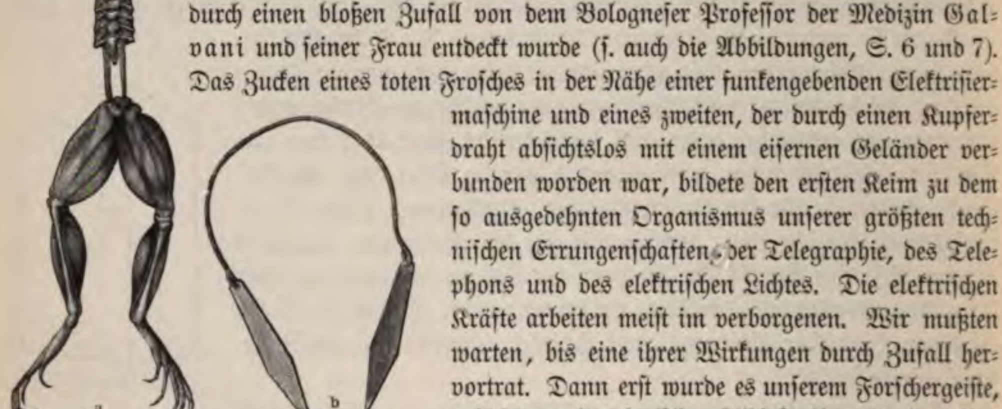
Den innigen Zusammenhang zwischen Licht und Elektrizität illustriert auch das merkwürdige Verhalten des Turmalins, desselben verwickelt gebauten Kristalls, der uns schon bei der Polarisation des Lichtes beschäftigt hat. Die sechsseitigen Säulen dieses Kristalles sind oben und unten in verschiedener Weise abgestumpft, wie es die obenstehende Abbildung zeigt. Erhitzt, wird er bei der Abkühlung deutlich elektrisch, indem er, gerade so wie eine geriebene Glasstange, leichte Gegenstände anzieht. Die nähere Untersuchung zeigt aber dabei noch die weitere höchst seltsame Tatsache, daß die beiden verschiedenen Enden der Kristallsäule, wie es auf der Zeichnung angegeben ist, im entgegengesetzten Sinn elektrisch werden. Ganz gleiche Erscheinungen treten auf, wenn man den Kristall, statt ihn abzukühlen, zusammenpreßt. Wir haben es hier mit einer Pyro- und Piezoelektrizität (Druckelektrizität) zu tun, für die wir ähnliche Erscheinungen schon beim Magnetismus wahrnahmen. Auch in dem Einfluß des Druckes auf die Brechungsverhältnisse der Kristalle finden wir ihr Analogon.

Riecke und Voigt in Göttingen haben die elektrischen Erscheinungen an Kristallen theoretisch und praktisch weiter verfolgt. Man kann dieselben so zusammenfassen, daß die elektrischen Spannungen, welche von ihnen ausgehen, mit den molekularen Spannungen, die ihre Kristallform bedingen, übereinstimmen. Ebenso wie wir diese Form aus den wundervollen farbigen Figuren ablesen können, die ganz dünne Blättchen von ihnen im polarisierten Lichte zeigen (s. die Tafel, S. 280), ebenso spiegelt sich diese Form auch in ihrem elektrischen Verhalten wieder. Da nun aber dieses eine Anziehungskraft bedingt, deren Kraftlinien sich in derselben Weise gruppieren wie die Hauptlinien eben ihrer kristallinischen Form, so wirft diese Übereinstimmung

ein sehr interessantes Licht auf die Entstehung der Kristalle selbst. Ist erst einmal ein noch so kleiner Kristall gegeben, so müssen die elektrischen Anziehungen, welche derselbe auf die umgebenden gleichartigen Moleküle übt, ihn genau unter denselben geometrischen Bedingungen weiterwachsen lassen, die der From des Ansatzkristalles entsprechen. Der Kristallisationsprozeß wird zu einer elektrischen Erscheinung.

d) Der galvanische Strom.

Die magnetischen und elektrostatischen Erscheinungen, mit denen wir uns bisher beschäftigten, sind es nicht, die der Elektrizität jene hervorragende Rolle in der technischen Anwendung der Naturkräfte verliehen haben, durch welche die Elektrizität heute in fast alle menschlichen Verhältnisse hineinspielt. Alle jene praktisch wichtigen Wirkungen verdanken wir vielmehr dem galvanischen Strom, einer Erscheinungsform der Elektrizität, die erst 1789 durch einen bloßen Zufall von dem Bologneser Professor der Medizin Galvani und seiner Frau entdeckt wurde (s. auch die Abbildungen, S. 6 und 7). Das Zucken eines toten Frosches in der Nähe einer funkengebenden Elektrisiermaschine und eines zweiten, der durch einen Kupferdraht absichtslos mit einem eisernen Geländer verbunden worden war, bildete den ersten Keim zu dem so ausgedehnten Organismus unserer größten technischen Errungenschaften, der Telegraphie, des Telephons und des elektrischen Lichtes. Die elektrischen Kräfte arbeiten meist im verborgenen. Wir mußten warten, bis eine ihrer Wirkungen durch Zufall hervortrat. Dann erst wurde es unserem Forschergeiste, geführt von den logischen Schlußreihen, die den Bau der naturwissenschaftlichen Disziplinen immer stolzer aufrichten, möglich, aus jenen verschwindend kleinen Wirkungen, die zu Verrätern wurden, neue und immer mächtigere Erscheinungsreihen hervorzuzaubern, die der Kraft des Menschengeistes ewige Denkmäler gesetzt haben.



Die Bestandteile des Froschschenkel-Experiments. a) Froschschenkel; b) galvanischer Erreger.

Heute noch pflegt man aus Achtung vor jenem gütigen Zufall das Froschschenkel-Experiment (s. die obenstehende Abbildung) häufig zu wiederholen, obgleich uns Batterien und Dynamomaschinen zu Gebote stehen, die millionenfach stärkere Wirkungen desselben galvanischen Stromes üben, der jenen Froschschenkel zucken läßt. Verbindet man ein zugespitztes Stückchen Kupfer mit einem gleichen Stückchen Zink durch einen beliebigen Metalldraht, b, so zuckt ein frisch präparierter Froschschenkel a jedesmal zusammen, wenn man ihn gleichzeitig mit beiden Spitzen berührt. Es ist, als ob diese beiden verbundenen Metalle wie ein Zauberstab wirken, der dem tierischen Körper auf einen Augenblick das Leben wiedergibt. Bei dem Experiment sind keine besonderen Vorsichtsmaßregeln nötig, wir brauchen uns z. B. ebensowenig wie den Froschschenkel zu isolieren. Man wäre deshalb, wenn etwa dieses Experiment durch Zufall ohne die parallelgehende Entdeckung Galvanis bei der Elektrisiermaschine zuerst gemacht worden wäre, wahrscheinlich gar nicht auf den Gedanken gekommen, daß es sich hier um eine elektrische Erscheinung handelt. Aber der Schenkel zuckt auch, wenn man ihn mit einer geriebenen Siegellackstange berührt, oder wenn man ihn nur für einen Augenblick in irgend ein elektrisches Feld bringt, wenn z. B. Funken aus der Elektrisiermaschine überspringen.

Mit den physiologischen Ursachen dieser Zuckungen wollen wir uns hier nicht befassen. Es genügt uns, zu erfahren, daß jeder elektrisch erregte Muskel im lebenden und sogar im toten Körper, solange er noch nicht zu vertrocknen oder sonst zu zerfallen beginnt, sich zusammenzieht, und zwar schlägt er bereits auf außerordentlich schwache Ströme an, für die er deshalb zum Verräter geworden ist. Wenn wir an unserem eigenen Körper ähnliche Wirkungen bei der Berührung mit jener Kupfer-Zink-Stange nicht verspüren, so liegt das nur an der weit größeren Verteilung jener sehr geringen Elektrizitätsmengen in unserem leitenden Körper. Aber wir empfinden dennoch davon eine sehr deutliche Reizwirkung, wenn wir, wie es schon in der Einleitung S. 26 beschrieben ist, die beiden verschiedenen Metalle in unsere Mundhöhle bringen und sie dann außen berühren. Es tritt dabei jedesmal bei geschlossenen Augen ein Lichtschein auf, der von jenem elektrischen Nervenreize herrührt.



Elektroskop zum Nachweis des galvanischen Stromes.

Galvani hatte die wahre Ursache der von ihm zuerst beobachteten Erscheinungen nicht erkannt. Ihm wurde es nicht bewußt, daß sie nur durch die Berührung zweier verschiedenen Metalle hervorgerufen wird. Erst Volta bewies dies unzweifelhaft und wurde dadurch zum eigentlichen Entdecker der sogenannten Berührungs-Elektrizität.

Läßt man ein Goldblattelektroskop (s. S. 315) statt mit einer Kugel oben in einer kupfernen Scheibe endigen und setzt auf diese eine Zinkscheibe mit isolierendem Griff, so zeigt der Apparat einen Ausschlag, wenn man die Platten vorsichtig nach obenhin wieder voneinander trennt (s. die obenstehende Abbildung). Das Experiment gelingt nicht mit zwei Kupfer- oder zwei Zinkplatten. Dagegen weichen die Goldblättchen wieder auseinander, wenn man Kupfer- und Zinkplatte mit gefirnißten, d. h. isolierten Flächen aufeinanderlegt und dann die nicht gefirnißten Außenseiten miteinander in leitende Verbindung bringt (s. die untenstehende Abbildung). Dieser Versuch zeigt, daß es bei dieser Anordnung nicht so sehr auf die Größe der berührenden Flächen ankommt.



Elektroskop mit Verbindung der isolierten Flächen.

Die bloße Berührung kann, in sehr schwachem Maße freilich, ebenso Elektrizität verursachen wie die Reibung. Von unserer Anschauung über den molekularen Aufbau der Materie aus mag uns diese Wahrnehmung gar nicht so besonders merkwürdig erscheinen. Wir wissen ja, daß eigentliche Berührungen der Moleküle unter sich überhaupt nicht stattfinden, wieviel weniger also Reibungen. Die größere oder geringere Durchdringlichkeit der Stoffe hat ihre Ursache in den Spannungen, die in und zwischen den Molekülen durch deren Bewegungen und die des Äthers hervorgebracht werden. Immer deutlicher haben wir die elektrischen Erscheinungen als intermolekulare Spannungen dieses Äthers erkannt. Wir müssen annehmen, daß sie immer vorhanden sind, sich aber für gewöhnlich im Gleichgewicht halten, so daß wir keine Wirkungen nach außen hin von ihnen wahrnehmen. Dringen nun aber Moleküle eines Körpers in die intermolekularen Räume eines anderen, so muß dieses Gleichgewicht gestört werden, wenn die Bewegungen der beiden Arten von Molekülen verschiedene sind, das heißt, wenn unter anderem verschiedene Stoffe zusammentreten. Elektrische Erscheinungen werden

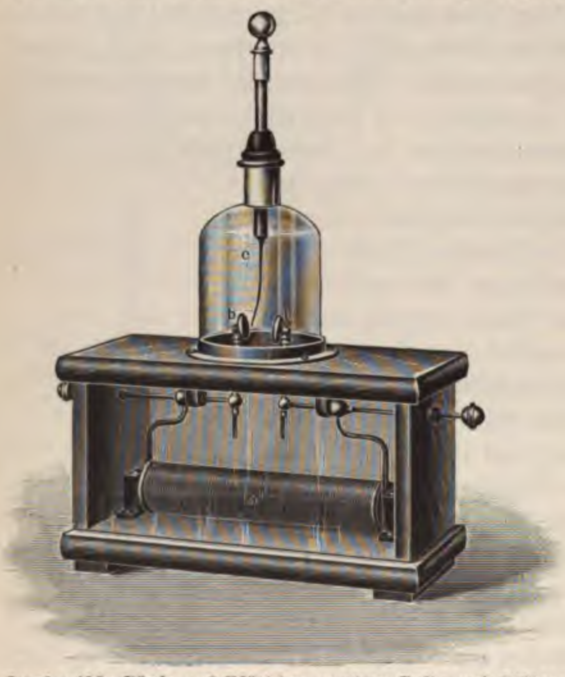
dadurch ausgelöst. Solches Eindringen von Molekülen des einen zwischen die eines anderen Stoffes muß nun sowohl bei der Reibung beider aneinander wie auch allein schon bei ihrer Berührung stattfinden, bei dieser aber gewiß in viel geringerem Maß als bei der Reibung. Die Beobachtung bestätigt dies. Die Mengen statischer Elektrizität, welche man durch Berührung hervorbringen kann, sind immer nur außerordentlich gering.

Voltasche Säule aus Paaren von Zink- und Kupferplatten mit angefeuchteter Papierzwischenlage.

Es mag hiernach so scheinen, als ob wir von der Berührungselektrizität keine anderen und jedenfalls keine kräftigeren Wirkungen erwarten dürften als von der Reibungselektrizität, und doch haben wir gerade der hierher gehörigen Gruppe von Erscheinungen jene gewaltigen Kraftwirkungen zu danken, die allgemein bekannt sind, und die heute schon dazu benutzt werden, ganze Eisenbahnzüge schneller als mit der Kraft des Dampfes dahinbrausen zu lassen.

Der scheinbare Widerspruch löst sich, wenn wir bedenken, daß durch solche bloße Berührung zweier verschiedener Leiter gewissermaßen eine ununterbrochen wirkende Elektrisiermaschine geschaffen wird, von der man die sich selbsttätig scheidenden Elektrizitäten beständig ableiten kann. Die Berührungselektrizität ist mit einer zwar sehr kleinen, aber beständig fließenden Quelle zu vergleichen, die schließlich große Reservoire füllen kann.

Zunächst wird es unsere Aufgabe sein, die durch Berührung erhaltenen Elektrizitätsmengen zu vergrößern, um ihre besonderen Eigenschaften näher studieren zu können. Wir sahen schon, daß in dieser Hinsicht durch Vergrößerung der Berührungsfläche nicht viel erreicht wird. Wohl aber geschieht dies, wenn wir die Berührung selbst durch Zwischenschaltung einer Flüssigkeit inniger machen, deren beweglichere Moleküle leichter zwischen die der festen Körper eindringen und aus diesem Grund alle elektrischen Erscheinungen fördern. Wir legen, um dies zu erreichen, zunächst auf eine Kupferplatte ein Stück Fließpapier, das wir mit angesäuertem Wasser, das besser leitet als gewöhnliches, befeuchtet haben, und setzen auf dieses erst die Zinkplatte. Verbinden wir nun beide Metalle wieder leitend miteinander, so erhalten wir schon eine größere Wirkung als zuvor. Eine solche Kombination nennen wir ein **Voltasches Element**. Beim Übereinanderlegen einer Anzahl solcher Elemente teilt sich die im ersten erzeugte Spannung dem zweiten mit und verstärkt dessen Wirkung, und so fort. Es entsteht auf diese Weise die **Voltasche Säule**, aus der wir bei genügender Anzahl von Elementen, d. h. Plattenpaaren, schon kleine Funken ziehen können (s. die obere Abbildung).



Zambonische Säule aus Blättchen unechten Gold- und Silberpapiers mit Fechnerschem Elektrometer. Vgl. Text, S. 331.

Nach dem gleichen Prinzip baut sich die sogenannte Zambonische Säule auf. Ihre Elemente setzen sich aus vielen kleinen Scheiben des käuflichen, unechten Gold- und Silberpapiers zusammen. Die metallisch glänzenden Substanzen dieses Fabrikats sind beiderseits auf Papier aufgetragen. Das unechte Gold besteht zum größten Teil aus Kupfer, der silberige Belag aus Zinn und Zink. Legt man solche Blättchen abwechselnd mit ihren Metallseiten aufeinander, so sind stets zwei Berührungselektrizität erzeugende Elemente durch Papier voneinander getrennt. Letzteres zieht nun immer aus der Luft genügende Feuchtigkeit an und bleibt dadurch leitend. Die Wirkung dieser Zambonischen Säule ist zwar sehr gering, aber sie arbeitet fast unbeschränkt lange, ohne irgend einer Wartung zu bedürfen. Mit ihrer Hilfe pflegt man ein sehr feinfühliges Elektroskop herzustellen, das zugleich auch die Art der untersuchten Elektrizität angibt, was beim gewöhnlichen Goldblattelektroskop bekanntlich nicht der Fall ist. Die Anordnung des Apparates ist aus der unteren Abbildung, S. 330, ersichtlich. Die beiden Enden der Zambonischen Säule a endigen in metallischen Platten b b, die in ein Glasgefäß eingelassen sind, und zwischen denen isoliert aufgehängt ein Goldblättchen c sich befindet. Die beiden Platten sind durch die Säule beständig mit entgegengesetzter Elektrizität geladen. Ist der Zeiger unelektrisch, so bleibt er in der Mitte zwischen den beiden Platten hängen. Wird er aber positiv geladen, so nähert er sich der negativen Platte, und umgekehrt. Richtet man es so ein, daß bei einer solchen Anziehung das Goldblatt die Platten berühren kann, so wird es bei der ersten Berührung eine mit der betreffenden Platte gleichnamige Ladung erhalten, nun von derselben abgestoßen werden, der anderen Platte zueilen und bei der Berührung auch von dieser wieder zurückschnellen. Dies geht anscheinend ohne Ende so fort. Ein solches scheinbares Perpetuum mobile kann in der Tat jahrelang seine pendelnden Bewegungen ausführen, ohne irgendwoher in sichtbarer Weise eine Kraftzufuhr zu erhalten. In Wirklichkeit findet indes eine, wenn auch sehr langsam fortschreitende Zersetzung der metallischen Bestandteile der Säule statt, und die Bewegungen des kleinen elektrischen Pendels hören endlich auf.



Volta-Batterie. K Kupfer; Z Zink; F Flüssigkeit. Vgl. Text, S. 333.

Nach dem Vorangegangenen kommt man leicht auf den Gedanken, die feuchte Zwischenschicht durch ein Gefäß mit Flüssigkeit zu ersetzen, die Kupfer- und die Zinkplatte also in ein etwa mit verdünnter Schwefelsäure angefülltes Becherglas zu stellen, so daß beide Platten nur mit der Flüssigkeit, aber nicht unter sich in Berührung kommen. Solch eine Kombination nennt man dann ein galvanisches Element. Man kann ebenso wie bei der Voltasäule eine Anzahl solcher Elemente zu einer galvanischen Batterie vereinigen, indem man immer eine Zinkplatte des einen Becherglases mit der Kupferplatte des nächsten leitend verbindet. Mit einer solchen sind theoretisch beliebig große elektrische Wirkungen durch Vermehrung der Elemente zu erzielen; praktisch wird aber namentlich dadurch eine Grenze gezogen, daß noch andere wirksamere Mittel zur Hervorbringung des galvanischen Stromes gefunden worden sind.

Bei näherer Untersuchung der Wirkungen einer solchen galvanischen Batterie zeigt sich zunächst, was auch schon bei der Zambonischen Säule bemerkt worden ist, daß die beiden verschiedenen Elektrizitäten sich an den gegenüberliegenden Enden der Batterie ansammeln; bei unserer Kupfer-Zink-Batterie finden wir stets die positive Elektrizität auf der Seite des Kupfers, die negative auf der des Zinks. Man spricht deshalb von einem positiven und einem negativen Pole der Batterie oder auch vom Kupfer- und vom Zinkpol.

Der Vorgang, welcher in einem solchen galvanischen Elemente die Scheidung der Elektrizität bewirkt, muß indes doch verwickelter sein, als wir es bis jetzt annehmen konnten. Die beiden Metallplatten können in dem Becherglas in beliebiger Entfernung voneinander stehen, ohne daß die Wirkung des Elementes deshalb wesentlich verändert würde. Die Moleküle von Kupfer und Zink kommen also direkt gar nicht mehr in Berührung miteinander. Es zeigt sich, daß auch schon bloßes Eintauchen von Zink in verdünnte Schwefelsäure die Scheidung der Elektrizitäten hervorruft. In der Tat wäre es nach allen Erfahrungen, die wir bisher an den Wirkungen der Naturkräfte gemacht haben, nur verwunderlich, wenn nicht jede Berührung zweier verschiedenartiger Stoffe elektrische Wirkungen in verschiedenem Maß ausübte, nachdem wir dies an zwei bestimmten Stoffen wahrgenommen haben. Die Scheidung der Elektrizität vollzieht sich also bereits an der Grenzschicht zwischen Zink und Schwefelsäure. Hier halten sich nun die beiden Elektrizitäten zunächst fest, wie die Beläge eines Kondensators. Auch durch die Berührung von Kupfer mit Schwefelsäure wird Elektrizität gespalten. Aber direkte Messungen sowohl wie auch eine sich auf die folgenden Tatsachen stützende Überlegung zeigen, daß die von der Berührung dieser beiden Stoffe erzeugte Scheidungskraft eine viel geringere ist, als die zwischen Zink und Schwefelsäure. Hierbei entsteht zwischen den beiden, in dem Becherglase zugleich enthaltenen Kondensatoren eine **Spannungsdifferenz**, welche die negative Elektrizität vom Kupfer zum Zink hinüber durch die Flüssigkeit trägt und auf der Kupferseite dafür eine gleiche Menge der anderen Elektrizitätsart freimacht. Es findet dabei ein wirklicher **Transport von Molekülen** zwischen den Platten statt, der durch die bei diesem Prozeß ausgelöste **elektromotorische Kraft** hervorgerufen wird. Da gleichzeitig in den vermittelnden Flüssigkeiten chemische Zersetzungen vor sich gehen, so nennt man sie **elektrolytische Leiter**.



Daniell-Element. T Tonzelle; Z Zinkzylinder; K Kupferzylinder. Vgl. Text, S. 333.

Wir haben also gesehen, daß Zink und Kupfer in Verbindung mit ein und derselben Flüssigkeit verschiedene elektrische Spannungen hervorrufen. Untersuchen wir die verschiedenen Metalle auf ihre gegenseitigen Wirkungen bei der Berührung, so finden wir, wie wir eine Reihe für die Wirkungen der Reibungselektrizität aufgestellt haben, eine **galvanische Spannungsreihe**: + Zink, Zinn, Blei, Eisen, Wismut, Kupfer, Silber, Gold, Platin —.



Meidinger-Element. A Glasgefäß, Z Zinkplatte, d Glasbecher, e Kupferblech, h unten offenes Glasrohr mit Kupfervitriol. Vgl. Text, S. 333.

Aus dieser Reihe ersehen wir, daß Zink in Verbindung mit Silber, Gold oder Platin eine noch größere Scheidungskraft besitzt als mit Kupfer, während dabei die Scheidung doch in derselben Richtung vor sich geht. Bringt man dagegen Kupfer mit Platin zusammen, so wird auf die Seite des Kupfers die positive Elektrizität getrieben, umgekehrt wie bei seiner Verbindung mit Zink, bei welcher sie von ihm hinweg zu dem Zink hinfließt. Auch hier tritt also wieder dieselbe Erscheinung wie bei der Reibungselektrizität auf, daß die Scheidung in bestimmte Elektrizitäten nicht eine spezifische, sondern nur eine relative Eigenschaft der Körper ist, die sich nach den gegenseitigen Beziehungen der miteinander in Verbindung tretenden molekularen Bewegungen richtet.

Ohne Zweifel werden auch durch die bloße Berührung zweier verschiedener Nichtleiter die Elektrizitäten geschieden; denn dies geschieht schon durch Reibung, die doch nur eine Vervielfältigung der Berührung ist. Da sie die getrennten Elektrizitäten aber nicht wegleiten, wird die

bloße Berührung nicht zu einer dauernden Elektrizitätsquelle wie bei den Leitern. Die ungemein geringen Mengen von freier Elektrizität, die durch solche einmalige Berührung ohne Ableitung erzeugt werden, sind deshalb nicht nachzuweisen. Insbesondere ist es nicht möglich, aus Isolatoren eine „Batterie" zusammenzustellen.

Die verschiedene Scheidungskraft der Leiter hat zum Bau der verschiedenen galvanischen Batterien geführt, von denen wir die gebräuchlichsten hier aufführen.

Das einfache Kupfer-Zink-Element wurde schon von Volta angewendet (s. die Abbildung, S. 331) und von Wollaston in seiner Form verbessert. Um die Wirkung zu erhöhen, hat Smee das Kupfer durch Silber, Grove durch Platin ersetzt. Solche Batterien werden dadurch wesentlich teurer.

Bei allen diesen Elementen tauchen die Metalle in dieselbe Flüssigkeit. Dies hat einen empfindlichen Nachteil, den man als die Polarisierung der Batterie bezeichnet. Die mit den elektrischen Vorgängen unzertrennlichen Zersetzungsprodukte stören den Prozeß der Elektrizitätserzeugung, weil sie ja die Art der Stoffe, auf deren Berührung es ankommt, ändern. Die Wirkung der Batterie vermindert sich bald und hört schließlich ganz auf.



Bunsen-Batterie. Aus vier Elementen zusammengesetzt.

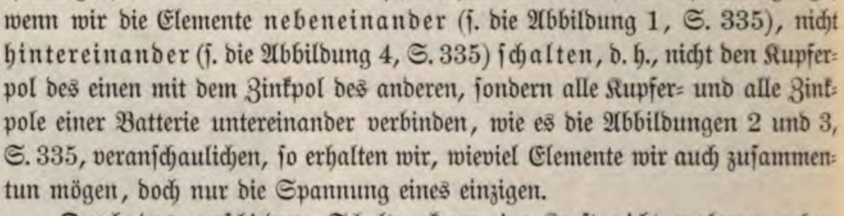
Dies wird durch die sogenannten konstanten Elemente vermieden, bei denen die beiden Metalle durch eine poröse Scheidewand getrennt werden, die wohl den elektrisch geladenen Molekülen den Weg zwischen beiden offen lassen, um dadurch die Elektrizitäten hinüberzutragen, während die beiden, nun verschieden gewählten Flüssigkeiten, welche die beiden Metalle umgeben, jene störenden chemischen Wirkungen nicht mehr ausüben. Das Daniell-Element (s. die obere Abbildung, S. 332) besteht deshalb aus einem Becherglas, in welchem ein poröses zylindrisches Tongefäß steht. Letzteres, die sogenannte Tonzelle T, ist außen von einem Zinkzylinder Z umgeben, der in verdünnte Schwefelsäure taucht. In der Tonzelle befindet sich ein Kupferzylinder K, von Kupfervitriollösung umgeben. Eine Modifikation des Daniell-Elementes bildet das Meidinger-Element, welches für Telegraphen- oder Telephonzwecke in Deutschland allgemein angewendet wird (s. die untere Abbildung, S. 332). Es hat keine Tonzelle, denn durch höheres spezifisches Gewicht kommt die schwerere, aus dem Glasrohr h sich bildende Kupfervitriollösung, die im Becher d das Kupferblech e umspült, nicht mit der die Zinkplatten Z benetzenden leichten Bittersalzlösung in Berührung.

Bei der sogenannten Groveschen Batterie wird Zink und Platin angewendet. Letzteres taucht in der Tonzelle in konzentrierte Salpetersäure. Bunsen hat das teuere Platin durch gepreßte und hartgeglühte Kohle ersetzt, wie man sie zu den Kohlenstiften der elektrischen Bogenlampen benutzt. Die Wirkung einer solchen Bunsen-Batterie ist eine sehr kräftige und wird deshalb zur Hervorbingung starker Ströme am meisten benutzt (s. die obenstehende Abbildung).

Diese beiden zuletzt genannten galvanischen Ketten haben die große Unannehmlichkeit, daß sie als Zersetzungsprodukt die giftige und alles Eisen verrostende Untersalpetersäure bilden. Auf

der Suche nach einer Flüssigkeit, die unschädlichere Zersetzungsprodukte liefert, fand Bunsen das **Chromsäure-Element**, das im übrigen auch aus Zink und Kohle besteht (s. die untenstehende Abbildung).

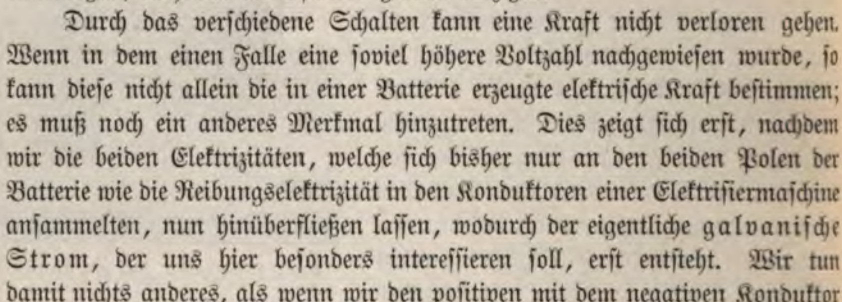
Wir haben von der verschiedenen Kraft der hier aufgeführten galvanischen Elemente gesprochen. Wenn wir dieselbe zunächst an ihren Spannungserscheinungen messen und in Volt ausdrücken, so ergibt sich, daß ein einzelnes Daniell-Element eine Spannung von 1,1 Volt verursacht, ein Bunsen-Element 1,9 Volt. Die Voltzahl summiert sich mit jedem hintereinander geschalteten Elemente, so daß also drei Bunsen-Elemente dreimal 1,9 Volt Spannung hervorbringen und drei Daniell-Elemente dreimal 1,1 Volt. Wie ungemein gering ist diese Spannung gegenüber der aus einer Elektrisiermaschine zu ziehenden, die leicht einen hunderttausendmal größeren Wert erreicht.

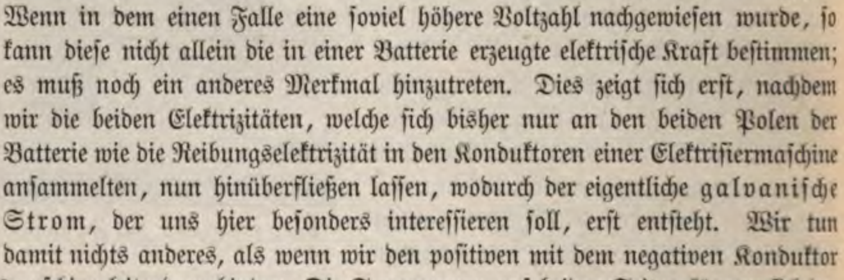


Die Voltzahl nimmt durch eine Vergrößerung der wirksamen Plattenflächen nicht zu. Es ist ganz einerlei, wie groß wir die Elemente bauen; sie liefern immer dieselbe Spannung. Ja, wenn wir die Elemente **nebeneinander** (s. die Abbildung 1, S. 335), nicht **hintereinander** (s. die Abbildung 4, S. 335) **schalten**, d. h., nicht den Kupferpol des einen mit dem Zinkpol des anderen, sondern alle Kupfer- und alle Zinkpole einer Batterie untereinander verbinden, wie es die Abbildungen 2 und 3, S. 335, veranschaulichen, so erhalten wir, wieviel Elemente wir auch zusammentun mögen, doch nur die Spannung eines einzigen.



Chromsäure-Flaschen-element mit Zink- und Kohleplatte.





Durch das verschiedene Schalten kann eine Kraft nicht verloren gehen. Wenn in dem einen Falle eine soviel höhere Voltzahl nachgewiesen wurde, so kann diese nicht allein die in einer Batterie erzeugte elektrische Kraft bestimmen; es muß noch ein anderes Merkmal hinzutreten. Dies zeigt sich erst, nachdem wir die beiden Elektrizitäten, welche sich bisher nur an den beiden Polen der Batterie wie die Reibungselektrizität in den Konduktoren einer Elektrisiermaschine ansammelten, nun hinüberfließen lassen, wodurch der eigentliche **galvanische Strom**, der uns hier besonders interessieren soll, erst entsteht. Wir tun damit nichts anderes, als wenn wir den positiven mit dem negativen Konduktor einer Reibungsmaschine leitend verbinden. Die Spannungen auf beiden Seiten können sich dadurch in jedem Augenblick ausgleichen; dafür wird aber sofort wieder die gleiche Menge von Elektrizität in der Batterie gebildet. Der Strom fließt also beständig, so wie es in der Leitung zwischen jenen beiden Konduktoren der Fall sein würde, solange die Maschine im Gang erhalten wird. Alle Erscheinungen, die wir in der Folge am galvanischen Strome wahrnehmen werden, sind deshalb auch, nur in quantitativ veränderter Weise, an einem solchen Strom einer Elektrisiermaschine wiederzufinden.

Durch die Gesamtwirkungen dieses Stromes bemißt sich seine Kraft. Halten wir das durch seine Benennung gegebene Beispiel fest und vergleichen den elektrischen Strom mit dem des fließenden Wassers, so gibt die Voltzahl den Druck an, welcher durch das Fließen des Stromes auf die Flächeneinheit geübt wird. Wir können einen „Voltmesser“ für einen Wasserstrom konstruieren, indem wir z. B. eine Metallspirale in eine Röhre einschließen, die auf der einen Seite mit einem festen, auf der anderen mit einem an der Spirale befestigten Deckel versehen ist. Stellen wir diese Röhre dem Strom entgegen, so wird die Größe, um welche der bewegliche Deckel vom strömenden Wasser in die Röhre gedrückt wird, ein Maß für die „Spannung“ desselben geben. Sie ist überall in dem Strome die gleiche, ob dieser nun eine große oder geringe Breite hat. Über die gesamte Arbeitsleistung des Stromes gibt ein solcher Messer

nur eine unvollständige Auskunft. Wir müssen zu dem Zwecke noch den Querschnitt des Stromes kennen, der seinerseits auch zur Messung nicht hinreicht, da ein träge fließender Strom von großer Breite weniger Gesamtkraft haben kann als ein schnell fließender mit weniger Wasserinhalt. Da die Voltzahl das Stromgefälle angibt, redeten wir auch von einem Potentialgefälle. Außer diesem führen wir nun noch, entsprechend unserem Vergleich mit dem Wasserstrom, eine neue Einheit für das Maß der elektrischen Stromstärke ein, die wir 1 Ampère nennen. Wie groß diese Einheit und auch die des Volt in unserem absoluten Zentimeter-Gramm-Sekundensystem ist, und wie man sie praktisch mißt, werden wir erst später (S. 347) mitteilen, wenn wir die betreffenden Wirkungen des galvanischen Stromes kennen gelernt haben, mit denen wir denselben messen können. Erst aus der Zahl der Ampère und Volt zugleich ist die Gesamtwirkungskraft eines Stromes zu errechnen. Wir nennen die elektrische Arbeit, welche ein Strom von der Stärke von 1 Ampère und der Spannung von 1 Volt in 1 Sekunde leistet, 1 Watt. Da diese Größe vollständig die Arbeitskraft eines galvanischen Stromes ausdrückt, können wir auch nach den Definitionen von Volt und Ampère diese Kraft von 1 Watt nach Pferdestärken bestimmen und finden, daß eine solche theoretisch gleich 736 Watt ist. Eine gewöhnliche elektrische Bogenlampe erfordert einen Strom von etwa 500 Watt. Wir brauchen also zur Unterhaltung eines solchen Lichtes theoretisch, d. h.

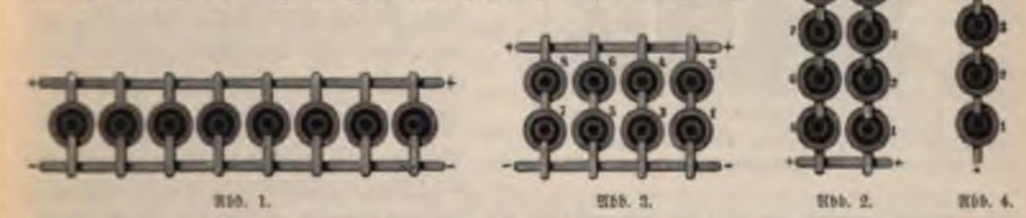


Abb. 1. Abb. 3. Abb. 2. Abb. 4.

Abb. 1. Nebeneinander geschaltete Elemente. Stromstärke achtfach, Voltzahl einfach. — Abb. 2. Nebeneinander geschaltete Vierfach-Elemente. Stromstärke zweifach, Voltzahl vierfach. — Abb. 3. Nebeneinander geschaltete Doppelelemente. Stromstärke vierfach, Voltzahl zweifach. — Fig. 4. Hintereinander geschaltete Elemente. Stromstärke einfach, Voltzahl achtfach. Vgl. Text, S. 334.

ohne Anrechnung der praktisch unvermeidlichen Kraftverluste, eine Maschine von etwa 3/4 Pferdestärke. Die Kraft eines Wasserstromes ist in verschiedener Weise verwendbar und danach umzugestalten. Einmal liegt uns daran, große Massen auf demselben zu transportieren, wenn auch entsprechend langsam; ein andermal wollen wir eine möglichst große Kraft auf eine kleinere Masse wirken lassen. Durch Einengen des Stromes fließt das Wasser schneller durch das kleinere Flußbett und entwickelt innerhalb desselben auf einer zwar kleineren Fläche als zuvor eine größere Kraft. Verkleinern wir, um uns in Maßeinheiten des galvanischen Stromes auszudrücken, die Ampèrezahl, so muß sich entsprechend die Voltzahl vergrößern. Umgekehrt vergrößern wir die Stromstärke, indem wir die Spannung verkleinern.

Aber die Gesamtarbeitsleistung wird bei solchen Umwandlungen doch niemals genau die gleiche bleiben. Bei Verengung des Strombettes wird die Reibung des Wassers in demselben eine größere; es geht freie Arbeitskraft verloren durch diesen Widerstand. Das Gleiche beobachten wir auch am galvanischen Strom. Die Gesetze, nach denen Stromstärke, Spannung und Widerstand miteinander in Verbindung treten, sind zuerst von Ohm näher untersucht worden. Er fand, daß die Stromstärke immer gleich der Stromspannung, auch die elektromotorische Kraft genannt, dividiert durch den Widerstand ist. Wir bezeichnen diese Beziehung als das

Ohmsche Gesetz. Den Widerstand, den ein Leiter einem Strom von 1 Volt und 1 Ampère entgegenstellt, nennen wir 1 Ohm. Genau wie bei einem Wasserstrom wächst der Gesamtwiderstand einer elektrischen Stromleitung zunächst mit der Länge derselben, dann umgekehrt mit ihrem Querschnitt und noch mit der Art des Materials, wie bei einem mehr oder weniger rauhen Flußbett. Ein langer Leitungsdraht schwächt also den Strom, ebenso vermindert seine Gesamtkraft ein dünnerer Draht, und endlich gibt es bessere und schlechtere Leiter, wie wir schon erfahren haben. Das Leitungsvermögen, also der reziproke Wert des Widerstandes, in Ohm ist z. B. für Silber gleich 59, für Kupfer 55, Platin 6,5, Wismut 0,8. Dasselbe stimmt annähernd mit dem Leitungsvermögen derselben Stoffe für die Wärme überein. Es ist oft von Wichtigkeit, den Widerstand eines Stromes genau zu regulieren. Dazu dienen die sogenannten Rheostaten (s. die untenstehende Abbildung), Instrumente, durch die man durch einfache Stöpselung mehr oder weniger Widerstände in Ohmeinheiten in einen Stromkreis einschalten kann, was auf verschiedene Weise, am einfachsten durch Verlängerung der Leitung mittels eingeschalteter Drahtrollen 1—4, geschehen kann.



Stöpselrheostat nach Siemens. abcd Widerstände; s Stöpsel; 1—4 Drahtrollen.

Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes können wir nun diejenigen Umformungen des galvanischen Stromes vornehmen, die wir für unsere praktischen Zwecke gebrauchen. Dieses Gesetz lehrt uns z. B., daß bei einer unveränderlichen Gesamtkraft, also bei einer gegebenen Zahl von Watt, eine Verkleinerung der Querschnittsfläche unseres verwendeten Leitungsdrahtes auf die Hälfte die Spannung des Stromes um das Doppelte erhöht, dagegen die Stromstärke, die Zahl der Ampère, welche den Draht durchfließen, auf die Hälfte herabsetzt. Ebenso wird die Stromstärke im Verhältnis von 55 zu 6,5 vermindert, wenn wir statt Kupferdraht Platindraht anwenden. Die größte Stromstärke überhaupt bei gegebener Gesamtkraft erhalten wir, wenn wir zur Leitung möglichst dicken Silberdraht verwenden, doch steht das Kupfer als Leitungsmaterial dem teuern Silber nur wenig nach.

Die elektrolytischen Leiter in den galvanischen Batterien setzen dem Strome natürlich gleichfalls einen Widerstand entgegen und zwar einen beträchtlich größeren als die metallischen Leiter. Vergrößert man ihre wirksamen Oberflächen, indem man die Elemente nebeneinander, nicht hintereinander schaltet (S. 334), so verändert sich dadurch der Gesamtwiderstand und also auch die Spannung nicht, dagegen wächst die Stromstärke, die Ampèrezahl. Dies gibt zugleich die Antwort auf unsere Frage auf S. 334, wohin die Kraft für die bei Nebeneinanderschaltung verloren gegangenen Volt gekommen sei. Wie die Schaltung einer Batterie für einen besonderen Zweck am besten geschieht, hängt von dem Verhältnis der Widerstände in der Batterie und außerhalb derselben, in dem Schließungsbogen, ab.

Auch die Verzweigungen eines elektrischen Stromes verhalten sich ganz genau wie die eines Wasserleitungssystems. Wir können auf einen in sich geschlossenen Stromkreis einen zweiten setzen. Ist der Widerstand in diesem nicht größer als in dem ersten, so wird der Strom auch über die Verzweigung mit derselben Kraft fließen. In eine solche Stromabzweigung schalten wir dann beliebige Widerstände ein, wenn wir dort einen Strom von anderen Eigenschaften als in der Hauptleitung verwenden wollen, ohne daß der Hauptstrom selbst, abgesehen von

dem Kraftverbrauch, eine Änderung erleidet. Die in eine Nebenleitung geschalteten Widerstände wirken wie ein vorgeschobenes Wehr, das einen Teil der Kraft vom Nebenstrom zu gunsten des Hauptstromes abhält. So kommt es in der Praxis z. B. häufig vor, daß man von derselben Maschine aus elektrische Glühlampen und Bogenlampen zu speisen hat. Die ersteren erfordern gewöhnlich eine Spannung von 110 Volt, die letzteren nur von 55 Volt. Man muß die Bogenlampen also in einen Nebenkreis mit einem entsprechend starken, vorgeschalteten Widerstand bringen. Die nebenstehende Zeichnung veranschaulicht die Schaltung solcher elektrischen Lichtanlagen.

Widerstand. Bogenlampen hinter einander geschaltet. Strom-quelle 110 V. Glühlampen neben einander geschaltet.

Schaltungsschema elektrischer Lichtleitungen.

Verzweigen wir eine wasserleitende Röhre in zwei Äste und führen diese dann wieder zusammen, so hat auf einer Verbindung, die wir zwischen den beiden Verzweigungen herstellen, das Wasser keine Veranlassung, hinüber oder herüber zu fließen, wenn der Druck in beiden Verzweigungen der gleiche ist (vgl. die untere Abbildung). Das Wasser steht auf dieser „Brücke" still. Ist aber auf einer der Verzweigungen ein Überdruck vorhanden, der durch entsprechende Drosselung erzielt wird, so fließt das Wasser auch über die „Brücke", was man durch die Bewegung eines Schaufelrädchens anschaulich machen kann. Diese Erwägung hat zum Bau eines sehr feinen Meßinstrumentes für elektrische Widerstände geführt, das man die **Wheatstonesche Brücke** nennt. Man schaltet auf derselben einen Apparat ein, einen Galvanometer, der hier nur den Zweck hat, nachzuweisen, daß kein Strom über die Brücke geht. Seine Konstruktion werden wir erst später (S. 345) kennen lernen. In die eine Verzweigung wird ein Rheostat geschaltet, in die andere der zu untersuchende Leitungswiderstand eingefügt. Wenn man den jetzt über die Brücke gehenden Strom durch Zuschaltungen mit dem Rheostat wegbringt, gibt dieser den gesuchten Widerstand an.



Hydraulisches Modell der Wheatstoneschen Brücke. Nach Spieß-Ernecke.

Wird das Bett eines Stromes gar zu sehr eingeengt, so vermag es schließlich die ihm zugeführten Wassermassen nicht mehr zu fassen, und ein Teil derselben kann sich nicht weiter an der allgemeinen Strömung beteiligen; er verläßt das Bett und vermindert dadurch die Gesamtkraft des Stromes. Diese Beobachtung machen wir auch beim galvanischen Strome. Durch eine aus abwechselnden Silber- und Platingliedern gefertigte Kette schicken wir einen Strom hindurch und sehen, wie von einer gewissen Stromstärke an die

Platindrahtglieder zu glühen beginnen, während die Silberglieder kalt bleiben. Wir wissen, daß Platin dem galvanischen Strome einen viel bedeutenderen Widerstand entgegenstellt als Silber. Unter den gegebenen Umständen kann es den ganzen Strom, der es zu durchdringen sucht, nicht mehr aufnehmen; es verwandelt deshalb einen Teil in Wärme, wobei die hierzu nötige Kraft der Gesamtstromstärke verloren geht.

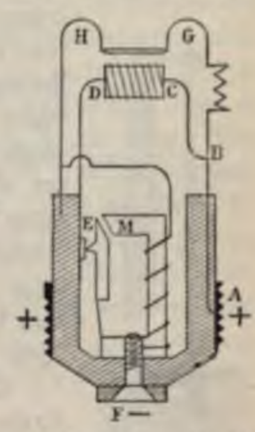
Diese Eigenschaft des galvanischen Stromes hat zu der Erfindung des elektrischen Lichtes geführt. Beim elektrischen Glühlicht befindet sich in der sogenannten Birne ein feiner Kohlenfaden, der dem Strome mehr Widerstand bietet als die zu ihm leitenden Verbindungen, so daß er zum Erglühen gebracht wird. Die Birne ist luftleer gemacht, um ein Verbrennen der Kohle an der Luft zu verhindern. Bei den Bogenlampen springt der Strom zwischen zwei Kohlenstiften über. Bringt man diese zunächst miteinander nahezu in Berührung, so macht der Widerstand der Luft, welche der Strom durchdringt, mit ihr auch die Kohle glühend. Entfernt man nun die beiden Spitzen langsam voneinander, so reißt der Strom von einer Spitze zur anderen Teile der glühenden Kohle herüber, die dann eine leitende Verbindung zwischen den Spitzen unterhalten. Durch das intensive Glühen dieser fliegenden Kohlenteilchen, die wegen des aufsteigenden heißen Luftstroms einen nach oben gewölbten Bogen bilden, entsteht das sogenannte Bogenlicht (s. die nebenstehende Abbildung). Die mit dem positiven Pole der Batterie verbundene Kohle höhlt sich dabei allmählich aus und bildet einen Krater, indem ihre Teilchen nach der negativen Kohle hinüberfliegen und hier eine Spitze bilden. Die enorme Hitze des Lichtbogens von mehreren Tausend Graden wird dazu verwendet, Stoffe zu verdampfen, die allen anderen Wärmequellen widerstehen. Man braucht nur Proben jener Stoffe in den Krater der positiven Kohle zu legen. Sie verflüchtigen sich sofort und färben das Bogenlicht, das man nun spektroskopisch untersuchen kann. Nur auf diese Weise ist es möglich, das Spektrum der meisten Metalle zu beobachten.



Bogenlicht.

Für praktische Beleuchtungszwecke ist begreiflicherweise diese unvermeidliche Entwickelung von Wärme unvorteilhaft. Wir haben schon in unserem Lichtkapitel auf S. 288 darauf hingewiesen, daß ein möglichst kaltes Licht auch das ökonomischste ist. Dies ist indes so zu verstehen, daß die Strahlung der betreffenden lichtaussendenden Materie so hoch getrieben werden muß, daß sie möglichst innerhalb der für unsere Lichtempfindung maßgebenden Schwingungszahlen fällt und nur noch wenig Wärmeschwingungen enthält. Wenn wir also von einem solchen „kalten“ Lichte sprechen, so könnten wir zugleich auch von ihm sagen, daß es „überheiß“

sein muß. Das neue, nach seinem Erfinder benannte Nernst-Licht ist aus solchen Betrachtungen entsprungen und bedeutet deshalb einen wesentlichen Fortschritt der modernen Beleuchtungstechnik. Während bisher sowohl bei der Glühlampe wie bei dem Bogenlicht der Glühkörper aus Kohle besteht, ist der Nernst-Körper aus Magnesiumoxyd hergestellt, welches noch höhere Temperaturen verträgt als Kohle, ohne zu verdampfen oder sonst zerstört zu werden. Es bietet zugleich dem elektrischen Strome noch einen größeren Widerstand als Kohle, wodurch ja, wie wir wissen, die Überführung der elektrischen Kraft in Wärme erleichtert wird. Das Magnesiumoxyd läßt sogar bei gewöhnlichen Temperaturen den elektrischen Strom überhaupt nicht durch, woraus eine Schwierigkeit für die Anwendung des Nernst-Lichtes entsteht, die indes technisch leicht überwunden werden konnte. Der Glühkörper muß erst angewärmt werden, ehe er in Funktion tritt. Man könnte das Nernst-Licht also mit einem Streichholz anzünden, aber der elektrische Strom gibt immer die Möglichkeit, die Anwärmung automatisch eintreten zu lassen. Das nebenstehende Schema gibt eine Anschauung von der Einrichtung einer Nernst-Lampe. Sie wird wie eine gewöhnliche Glühlampe an die Stromleitung geschraubt; bei A tritt der Strom ein, bei B verzweigt er sich. GH ist der Nernst-Körper, durch den aber der Strom bei gewöhnlicher Temperatur nicht geht, sondern nur durch den Anwärmer CD, der aus feinem, über eine Porzellanrolle gewickelten Platindraht besteht. Dieser erglüht beim Durchgange des Stromes und erwärmt den Nernst-Körper, der nun den Strom durchläßt und schnell zu leuchten beginnt. Vorher ging der Strom von D zu dem Kontakt E und dann durch die Schraube F wieder aus der Lampe heraus. Sobald er aber nach der Anwärmung den Glühkörper passiert, wird er den Elektromagneten M erregen, der den Kontakt bei E aufhebt, so daß der Strom nun nicht mehr durch CD gehen kann. Zwischen der Einschaltung des Stromes und dem Erglühen der Lampe vergehen nur wenige Sekunden. Das Licht der Nernst-Lampe ist ein ungemein weißes, das zwischen dem gelblichen Lichte der gewöhnlichen Glühlampen und dem bläulichen der Bogenlampe liegt. Letztere verbraucht etwa 3 Watt für die Leuchtkraft einer Normalkerze, das Nernst-Licht nur die Hälfte, d. h. es ist noch einmal so billig.



Schaltungsschema für die Nernstsche Glühlampe mit elektrischem Vorwärmer.


Prinzip des Mikrophons. a Kohlenplatten, b Kohlenstift. Vgl. Text, S. 340.

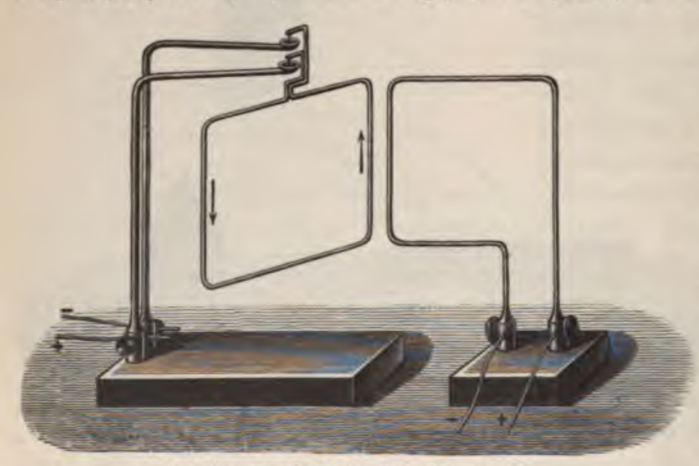
Seit man in neuerer Zeit über Ströme von genügender Kraft verfügt, hat man die **Umwandlung der Elektrizität in Wärme** auch vorteilhaft zu einem **Schweißverfahren** angewandt. Durch einen starken Strom, der in einen Kübel mit Wasser geleitet wird, bringt man es dahin, daß ein Eisenbarren, der mit dem anderen Leitungsdraht in Verbindung steht, in diesem Wasser in wenigen Augenblicken kräftig zu glühen beginnt und nun mit einem anderen, der auf die gleiche Weise erhitzt ist, zusammengeschweißt werden kann. Obgleich die durch den elektrischen Strom erzeugte Wärme im allgemeinen wohl teuerer zu stehen kommt, als die durch Verbrennung erhaltene, so ist doch das elektrische Schweißverfahren insofern ökonomischer, als man ja sonst, um ein Stück Eisen zum Glühen zu bringen, einen ganzen Ofen heizen muß, während man bei dem elektrischen Verfahren die Wärmeentwickelung in vorteilhafter Weise räumlich beschränkt.


Rogetsche Spirale. Vgl. Text, S. 343.

Daß man den elektrischen Strom auch zum **Heizen von Öfen** und zum **Kochen** benutzt, braucht nach dem Vorangegangenen nur erwähnt zu werden.

Es sei schließlich noch erwähnt, wie man die Wärmeentwickelung des elektrischen Stromes anwendet, um sich vor Schaden zu bewahren, der durch sie leicht entstehen könnte. Wird in einem Stromkreise, der Glühlampen speist, der Strom zu stark, so fassen die dünnen Glühfäden ihn nicht mehr und müssen zerreißen. Da aber die Stromstärke bei Anwendung der stromerzeugenden Maschinen, die wir noch kennen lernen werden, Schwankungen ausgesetzt ist, so hat man in die Hauptleitungen sogenannte **Bleisicherungen** eingeschaltet, die bei zu großer Stromstärke schmelzen und dadurch den Strom unterbrechen, ehe er die Glühlampen zerstören kann.

Das **Mikrophon** (s. die untere Abbildung, S. 339), welches man in Verbindung mit dem Telephon t benutzt, um dessen Wirkung zu verstärken, ist, wenigstens in seiner ursprünglichen Form, ein höchst einfaches Instrument, dessen Tätigkeit auf dem Widerstande beruht, den ein zwischen zwei Kohlenplatten aa eingepaßter Kohlenstift b dem von der Batterie c durchgeschickten Strome bietet. Bei den leisen Erschütterungen, die der Kohlenstift durch die Schallwellen erfährt, werden seine Kontakte im Rhythmus dieser Schallwellen verändert und damit auch die Stromstärke. Auf diesen, mit den Schallwellen parallel gehenden Schwankungen der Stromstärke beruht aber die Wirkung des Telephons (s. S. 357).



Ampèresches Gestell. Vgl. Text, S. 343.

Ehe wir uns spezielleren Eigenschaften des galvanischen Stromes zuwenden, werfen wir von unseren neu gewonnenen Erfahrungen aus noch einen vergleichenden Rückblick auf die statische Elektrizität, die mit der fließenden Elektrizität,

wie wir behaupteten, im Wesen völlig übereinstimmt und doch in ihren Äußerungen so sehr verschieden ist.

Wir haben gesehen, daß wir mit Hilfe einer Elektrisiermaschine leicht Hunderttausende von Volt erzeugen können. Dennoch würden wir nicht im stande sein, mit dem durch eine solche Maschine hervorgerufenen Strom auch nur eine gewöhnliche Glühlampe zu speisen, die doch nur eine Spannung von 110 Volt erfordert. Der Techniker erklärt dies sehr einfach, indem er sagt, daß der Strom der Elektrisiermaschine nicht die nötige Zahl von Ampère besitzt. Aber warum nicht? Weshalb können wir die überschüssige Zahl von Volt nicht in Ampère verwandeln? Ein einfaches Rechenexempel zeigt dies. Wir wissen, daß die Anzahl von Watt, die wir für eine elektrische Wirkung gebrauchen, aus der Multiplikation der Volt mit den Ampère des gegebenen Stromes hervorgeht und sich dann in Pferdestärken ausdrücken läßt. Elektrisiermaschinen können wir nun aus praktischen Gründen nicht in beliebiger Größe herstellen, denn eine solche, die wir mit einer Zehntelpferdestärke in Bewegung setzen, gibt schon eine Spannung von vielleicht 200,000 Volt. Nun wird die Kraft, mit welcher wir die Maschine drehen, unmöglich durch die Übersetzung in Elektrizität größer. Wir dürfen also annehmen, daß in unserem Falle (S. 335) 73,6 Watt = 200,000 Volt $\times$ x Ampère sind, und erfahren hieraus durch Rechnung, daß die Stromstärke für 1 Volt Spannung nur $^1/_{2720}$ Ampère im höchsten Falle beträgt, wobei noch zu bemerken ist, daß hier die meiste Arbeit in Wärme übergeht. Eine Glühlampe erfordert aber einen Strom von etwa $^1/_2$ Ampère. Wir sehen, mit wie ungemein schwachen Strömen wir es hier zu tun haben. Ja, solange die hier angegebenen Spannungen wirklich vorhanden sind, strömt eigentlich die Elektrizität gar nicht, sondern ist in den Konduktoren wie in geschlossenen Reservoiren angesammelt. Nur wegen des dauernden Verlustes an die Luft kann man allenfalls von einer Strömung reden; sie tritt aber erst auf, sobald wir die beiden entgegengesetzt geladenen Konduktoren miteinander leitend verbinden. Dann hören die Spannungserscheinungen sofort auf oder werden doch erheblich vermindert, auch wenn wir die Maschine weiter in Tätigkeit erhalten. Der Leitungsdraht hat nun nur noch die Eigenschaften eines schwachen galvanischen Stromes.



Oerstedtscher Versuch. Vgl. Text, S. 343.

Wir könnten nun fragen, weshalb nicht auch die Batterien aus sich heraus so starke Spannungen erzeugen können wie die Elektrisiermaschinen, da jene doch eine so viel größere Gesamtkraft, Arbeitsenergie, entwickeln. Weshalb sammelt sich die in den Batterien entstehende Elektrizität nicht ebenso an den Enden einer offenen galvanischen Kette an, wie in den Konduktoren einer Elektrisiermaschine? Weil die molekularen Elektrisiermaschinen, die **Rheomotoren**, die bei der Berührung der Metalle mit den Elektrolyten wirksam werden, sofort ihre Tätigkeit einstellen, wenn die bestimmte ihnen eigentümliche Spannung erreicht ist. Die Kraft eines jeden dieser unsichtbar kleinen Wirkungselemente ist keine große; sie wird von den entgegenstehenden Spannungen gehemmt, wie wir auch eine solche hemmende Wirkung bei der Drehung einer Elektrisiermaschine sehr bald empfinden, wenn die von ihr erzeugten Spannungen eine gewisse Größe erreicht haben. Wir müssen uns also auch bei dieser einen Grad der Gegenwirkung denken, bei dem die zur Verfügung stehende Kraft nicht mehr genügt, die Maschine noch schneller zu bewegen. Dann bleibt die Spannung auf einer konstanten Höhe,

wie wir es an den Enden eines geöffneten galvanischen Stromes wahrnehmen. Sowie aber dem Strome ein Weg geöffnet wird, treten unsere großen wie auch unsere molekularen Maschinen wieder in Tätigkeit und liefern immer dieselbe Maximalspannung; die Zahl der molekularen Maschinen gibt nur dann die Stärke des Stromes, wenn alle Einzelströme nebeneinander in die Hauptleitung geführt werden. Leiten wir aber den Strom einer dieser Maschinen auf die andere, so ist diese schon von vornherein mit der betreffenden Spannung geladen und kann nun die doppelte Spannung liefern. In diesem Sinn arbeitet die mehrplattige Influenzelektrisiermaschine (s. die Abbildung, S. 317). Bei der Reibungselektrizität zwingen wir durch eine von außen geübte Gewalt die Elektrizitäten, sich so in den Konduktoren anzusammeln, als wenn wir Wasser in einem überall geschlossenen Behälter stark zusammenpressen. Auch das Wasser wird dann gegen die Wände drücken und dort eine hohe Spannung hervorrufen.

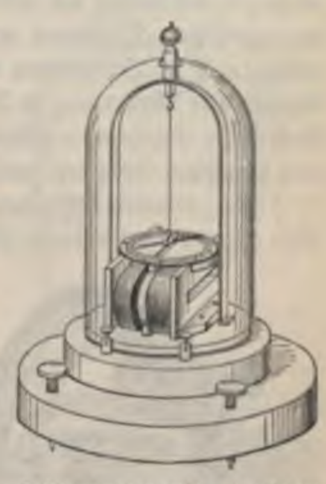


H. Chr. Oerstedt. Nach Werckmeister, „Das 19. Jahrhundert in Bildnissen". Vgl. Text, S. 344.

Im Zusammenhange damit steht auch der bemerkenswerte Unterschied zwischen dem galvanischen Strom und der statischen Elektrizität, die sich nur auf der Oberfläche der Konduktoren zeigt, während der galvanische Strom die Leitungsdrähte ganz erfüllt. Sonst wäre ja auch nicht zu verstehen, daß der von den Drähten geleistete Widerstand von der Flächenausdehnung ihres Querschnittes abhängt (S. 335). Die kleinsten Teilchen der angenommenen elektrischen Flüssigkeiten suchen einander zu fliehen, wenn sie gleichnamig sind. Solange die Flüssigkeit stillsteht, kann dies nur geschehen, wenn sie sich möglichst gegen die Wände des Gefäßes drängt. Sobald sie aber strömt, ist dieses Bedürfnis nicht mehr vorhanden, vielmehr wird sich die Flüssigkeit am leichtesten in der Richtung des Stromes ausbreiten und erfüllt gerade deshalb so viel als möglich ihren Leitungskanal, während ihr Druck auf die Seitenwände nachläßt.

e) Der Elektromagnetismus.

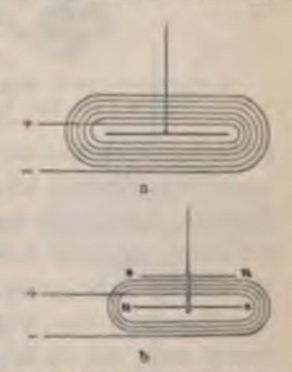
Da es bei der statischen Elektrizität offenbar die hohen Spannungen waren, die jene anziehenden und abstoßenden Wirkungen auf leichte Gegenstände hervorbrachten, so wird es uns nicht auffallen, daß die von galvanischen Strömen durchflossenen Drähte ähnliche Erscheinungen nicht zeigen. Dagegen bemerken wir, daß sie aufeinander wirken. Winden wir einen Leitungsdraht zu einer Spirale zusammen, so verkürzt sich diese, wenn ein Strom hindurch geschickt wird. Wir können dies besonders deutlich sehen, wenn wir die Spirale, wie dies Roget tat, mit ihrem unteren Ende in einen kleinen Napf mit Quecksilber tauchen lassen, so daß sie bei ihrer Verkürzung aus dem Quecksilber gezogen und dadurch die Verbindung unterbrochen wird (s. die obere Abbildung, S. 340). Damit ist die Ursache der Verkürzung beseitigt, die Spirale taucht wieder in das Quecksilber herab, schließt den Strom, verkürzt sich wieder und so fort, so daß also ein fortwährendes Auf- und Niederwippen entsteht. Durch eine Nebenwirkung des Stromes, die nicht direkt auf Anziehung beruht, kann die Erscheinung nicht erklärt werden, insbesondere nicht etwa durch Wärmewirkung, denn diese würde ja umgekehrt die Spirale verlängern. Die einzelnen Windungen der Spirale ziehen demnach einander wirklich an.



Galvanometer mit astatischem Nadelpaar. Vgl. Text, S. 345.

Noch deutlicher zeigen wir diese Wirkung an dem sogenannten Ampèreschen Gestell. Wie aus der unteren Abbildung, S. 340, ersichtlich ist, stehen sich zwei von Strömen durchflossene Drahtgestelle gegenüber, von denen das eine sich um eine Achse drehen kann. Gehen durch die benachbarten Drähte der beiden Stromkreise Ströme in gleicher Richtung, so wird der bewegliche Draht zu dem festen hingezogen, umgekehrt aber, wenn die Ströme entgegengesetzte Richtungen haben, abgestoßen. Wir sehen also hier zum erstenmal, daß es nicht einerlei ist, in welcher Richtung ein galvanischer Strom fließt, ob von dem positiven zum negativen Pol oder umgekehrt.

Diese Wahrnehmung der gegenseitigen Anziehung und Abstoßung galvanischer Ströme bringt uns auf den Gedanken, ob nicht Beziehungen zwischen diesen und den ähnlichen magnetischen Erscheinungen bestehen. Diese stellen sich wirklich sofort in überraschender Weise heraus.

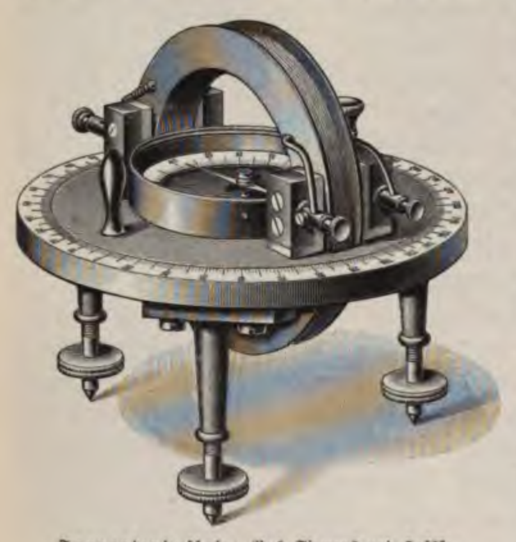


Lage der Magnetnadel im Multiplikator des Galvanometers. a einfache Nadel, b astatisches Nadelpaar. Vgl. Text, S. 344 und 345.

Zieht man einen Leitungsdraht parallel zur Richtung des magnetischen Meridians und stellt eine Magnetnadel unter denselben, die dann ohne weitere Einwirkung mit ihm parallel von Norden nach Süden zeigt, so stellt sie sich sofort quer zu der Richtung des Drahtes, also von Westen nach Osten, wenn ihn ein genügend starker Strom durchfließt (s. die Abbildung, S. 341). Auch hier ist es nicht einerlei, in welcher Richtung wir den Strom gehen lassen. Fließt der positive Strom nach Norden, so wird der Nordpol der Nadel nach Westen abgelenkt, und umgekehrt. Die Größe der Ablenkung hängt von der Stärke des Stromes ab. Sehr merkwürdig

ist es nun, daß die umgekehrten Ablenkungsrichtungen beobachtet werden, wenn die Nadel sich über dem Drahte befindet. Diese Fundamentalversuche über die Beziehungen zwischen Elektrizität und Magnetismus wurden 1820 von Oerstedt zum erstenmal angestellt (s. das Porträt, S. 342). Sie sind die Grundlage geworden für alle die großartigen technischen Anwendungen der elektrischen Kraft, die zum bei weitem größten Teil auf elektromagnetischen Wirkungen beruhen. Wie viele Keime zu gleich mächtigen Entwickelungen mögen noch im Verborgenen liegen, bis sie ein Zufall aufdeckt! Je tiefer wir aber, ohne die technische Verwertung in kurzsichtigem Egoismus zu verfolgen, in das innere Wesen der Naturkräfte einzudringen suchen, desto mehr wird eine systematisch geführte Forschung uns von dem launischen Spiel des Zufalles unabhängig machen.

Die geschilderte Ablenkung einer Magnetnadel durch einen einfachen, von einem galvanischen Strome durchflossenen Draht ist nur eine verhältnismäßig geringe. Aber jeder hinzukommende, vom gleichen Strome durchflossene Draht vervielfältigt seine Wirkung auf die Nadel. Da wir gesehen haben, daß ein unter der Nadel vorbeifließender Strom die entgegengesetzte Ablenkung hervorruft wie ein oberhalb fließender, so können wir unterhalb der Nadel nun ebenfalls ein System von Drähten ausspannen, durch welche wir den Strom in umgekehrter Richtung schicken wie oberhalb; dann müssen auch diese Drähte die ablenkende Wirkung verstärken. Praktisch erreichen wir die gewünschte Anordnung am einfachsten, wenn wir die oberen und die unteren Drähte zu einer zusammenhängenden Spirale vereinigen, dann wird die ablenkende Wirkung des Stromes sich in demselben Maße vervielfältigen, als diese Spirale Windungen hat. Man nennt deshalb eine solche Vorrichtung einen Multiplikator. Legt man die Windungen des Leitungsdrahtes zu einer Rolle zusammen, so muß man selbstverständlich dafür sorgen, daß die nebeneinander liegenden Drähte sich nicht leitend berühren, weil ja sonst der Strom gar nicht spiralförmig zirkulieren würde. Man umgibt also die Drähte mit einer isolierenden Substanz; für stärkere nimmt man Guttapercha, während für dünnere Seide genügt.



Tangentenbussole. Nach Siemens und Halske. Vgl. Text, S. 345.

Die durch eine solche Multiplikatorrolle hervorgerufene Ablenkung einer Magnetnadel benutzt man, um die Kraft des wirkenden Stromes selbst zu messen und zugleich auch seine Richtung zu bestimmen. Zu diesem Zweck bringt man eine an einem feinen Faden hängende Magnetnadel in das Innere der Rolle (s. a der unteren Abbildung, S. 343) und befestigt an dem Faden einen Spiegel, der die Drehung des Fadens bei einer Ablenkung der Nadel mitmachen muß. Die Drehung des Spiegels wird durch einen Lichtzeiger (S. 208) beobachtet. Um die Bewegungen der Nadel im vorliegenden Falle von dem Einfluß des Erdmagnetismus unabhängig zu machen, verbindet man sie durch dieselbe Drehungsachse mit einer zweiten, über der Multiplikatorrolle befindlichen Nadel, deren Pole entgegengesetzt zu denen der anderen

Nadel sind. So entsteht die **astatische Nadel** (b der unteren Abbildung, S. 343). Die ganze Anordnung, das **Galvanometer** (s. die obere Abbildung, S. 343), ist ein Instrument von außerordentlicher Feinheit, das sehr geringe Mengen von strömender Elektrizität nachweist und zu den verschiedenartigsten Zwecken angewendet wird, auch in Verbindung mit der Wheatstoneschen Brücke (S. 337). Eine entsprechende Modifikation dient als „Voltmesser", der die in einem Stromkreise herrschende Spannung und ihre Schwankungen jederzeit durch einen Zeiger angibt.



Ampèresche Regel.

Ein ähnliches Instrument ist die **Tangentenbussole**, die zur Vergleichung stärkerer Ströme verwendet zu werden pflegt (s. die Abbildung, S. 344). Man benutzt bei ihr meist nur wenige Windungen, die einen im Verhältnis zur Nadel großen Kreis um sie bilden. Es läßt sich leicht zeigen, daß die Kraft des Stromes bei solcher Anordnung der Tangente des Ablenkungswinkels der Nadel proportional sein muß. Daher rührt der Name des Instrumentes.

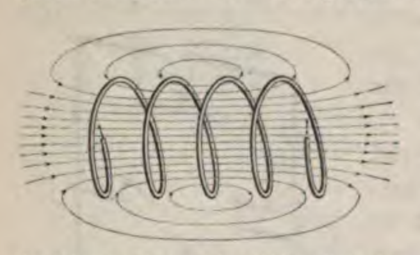
Diese Wirkungen des Stromes auf die Magnetnadel beweisen, daß den Leitungsdraht ein magnetisches Feld umgibt, das aber offenbar ganz anders beschaffen ist als das eines Magneten. Einem solchen wendet die Nadel unter allen Umständen entweder ihren Nord- oder ihren Südpol zu, aber niemals einem von einem galvanischen Strom durchflossenen Draht. Zu diesem stellt sie sich immer senkrecht, wechselt aber gleichfalls die Richtung ihrer Pole je nach der Richtung des Stromes. Es mag hier über diese Richtung ein leicht zu behaltendes Anschauungsmittel, die sogenannte **Ampèresche Regel**, Auskunft geben. Legen wir die rechte Hand über die Richtung des positiven Stromes, so daß also die Finger nach dieser hinzeigen, so gibt der ausgestreckte Daumen die Richtung an, nach welcher das Nordende der Nadel, n, abgelenkt wird (s. obenstehende Abbild.).

Der galvanische Strom muß also magnetische Kraftlinien rings um sich her verbreiten, die einen ganz anderen Verlauf haben, als wenn der betreffende Draht magnetische Eigenschaften besäße; ja, wir können von vornherein sagen, daß die beiden Systeme von Kraftlinien aufeinander senkrecht stehen werden. Dies bestätigt ein einfaches Experiment. Wir führen einen Draht senkrecht durch ein Stück Kartonpapier, das wir mit Eisenfeilspänen bestreuen, und leiten einen genügend starken Strom durch den Draht. Dann ordnen sich durch leichte Erschütterungen die Eisenteilchen um jenen zu Kreisen, welche die Kraftlinien des Stromes darstellen (s. die nebenstehende Abbildung).


Kraftlinien eines geradlinigen galvanischen Stromes.

Diese Entdeckung ist von großer Wichtigkeit für die Klärung unserer Ansichten über das Wesen aller dieser Erscheinungsreihen. Die sich zu Kreisen vereinigenden Eisenteilchen stellen nur einen Querschnitt der molekularen Vorgänge dar, die diese Ordnung hervorbrachten. Die zugehörigen Ätherbewegungen gehen demnach offenbar nicht in Kreisen vor sich, sondern in Spiralen, da der elektrische Strom sich ja sehr schnell in der Richtung des Drahtes vorwärts bewegt. Der Querschnitt dieser Spirale, die den Draht als Achse umgibt, wird durch diese Kreise aus Eisenstäubchen nur veranschaulicht. Wir haben hier genau dieselbe **schraubenförmige Bewegung des Äthers** vor uns, die wir zur

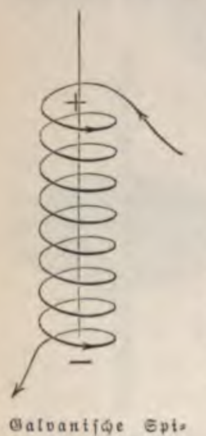
Erklärung der Erscheinungen des Lichtes annahmen, doch waren allerdings jene Ätherspiralen des Lichtes so ungemein klein, daß man ihr Vorhandensein nur auf Umwegen nachweisen konnte (S. 222). Hier, in den Ätherströmen, die einen galvanischen Leitungsdraht umkreisen, haben wir Wellen von weit größeren Dimensionen vor uns, und wir könnten schon nach den wenigen Erfahrungen, welche wir darüber bis jetzt gesammelt haben, behaupten, daß sie alle wesentlichen Eigenschaften des Lichtes, nur in verschiedenem Maßstabe, teilen müssen, eine Schlußfolgerung, die erst auf vielen Umwegen dem genialen Hertz in augenfälligen Experimenten durchzuführen gelungen ist. Unser durch die modernen Anschauungen über die molekularen Bewegungen geläuterter Blick läßt uns schon an dieser Stelle jene Übereinstimmung als zweifellos erscheinen, und das Wesen der Elektrizität ist deshalb für uns nicht geheimnisvoller mehr als das des Lichtes und der Wärme. Besonders wundert es uns nicht, die Geschwindigkeit des elektrischen Stromes mit der des Lichtes übereinstimmend gefunden und dabei nachgewiesen zu haben, daß das Lichtbrechungsvermögen mit dem der elektrischen Durchlässigkeit in einem konstanten Verhältnis steht.


Kraftlinien einer galvanischen Spirale.

Schon an dieser Stelle können wir mindestens vermuten, daß diese den galvanischen Draht umschlingenden Ätherwirbel den eigentlichen galvanischen Strom bilden und der Draht nur als Achse dient, an die augenscheinlich sich der Strom aus irgend einem Grunde heften muß.

Diese neuen Anschauungen geben auch sofort die Brücke zwischen den so verschiedenartig auftretenden Erscheinungen der Elektrizität und des Magnetismus. Wir hatten die magnetischen Wirbel des Äthers, auf die uns die magnetischen Kraftlinien seinerzeit brachten, bildlich auf S. 296 durch umschwingende Wasserräder dargestellt, von denen je zwei entgegengesetzte Bewegungsrichtungen haben. Das gleiche Bild läßt sich auf zwei in entgegengesetzter Richtung fließende galvanische Ströme anwenden. Vereinigen wir die Wirbel eines solchen vom galvanischen Strom durchflossenen Drahtes, der selbst wieder eine Spirale bildet, zu einem Ganzen, so bildet sich die obenstehende Stromfigur, die sich vollkommen mit der eines magnetischen Wirbels (S. 295) deckt.

Stecken wir in eine solche galvanische Spirale einen Eisenkern, so wird derselbe magnetisch; wir haben einen Elektromagnet geschaffen, der seine Wirkung sofort wieder verliert, sobald die umschließende Spirale stromleer ist. Die Lage seiner Pole entspricht der Richtung des galvanischen Stromes, bei deren Wechsel sich auch sofort die Pole des Elektromagneten umkehren. Die betreffenden Richtungen sind durch die nebenstehende Figur veranschaulicht.

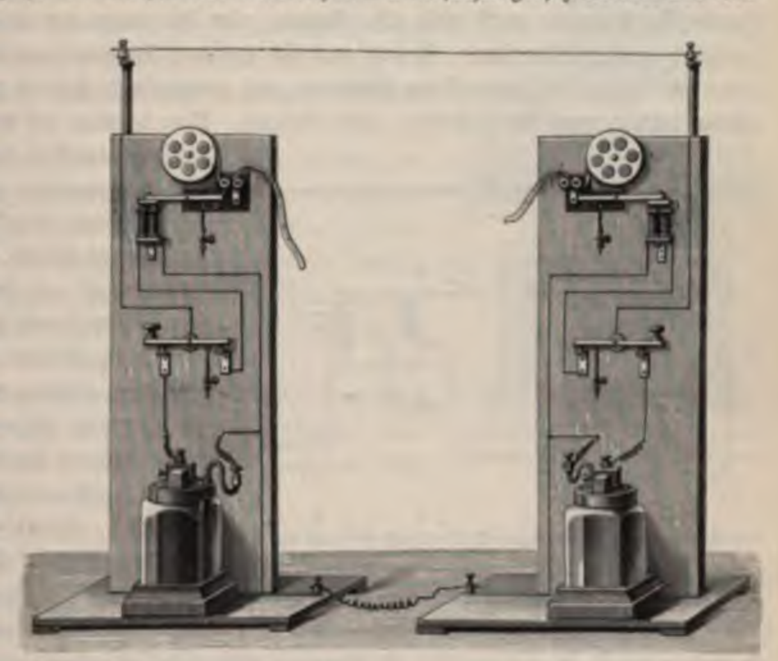


Galvanische Spirale und Magnet.

Die Stärke der Magnetisierung eines von einer galvanischen Spirale umgebenen Eisenkerns richtet sich nach der Stärke des Stromes, so daß jene direkt zu einem Maß für diese verwendet werden kann. Man hat zu diesem Zweck auch wieder das Zentimeter-Gramm-Sekundensystem verwendet und nimmt als theoretische Einheit der Stromstärke die magnetisch anziehende Kraft von 1 Dyn, die von dem durch einen Draht von 2 cm Länge und 1 cm Halbmesser fließenden elektrischen Strom erzeugt wird, wenn dieser

Draht wie bei der Tangentenbussole kreisförmig geschlossen ist und auf einen Magnet von der früher definierten Einheitskraft (S. 300) wirkt. Nur der zehnte Teil dieser Einheit ist das schon oft angewendete, aber bisher nicht definierte Ampère. Man kann diese Kraft praktisch durch den Widerstand messen, den ein in einer galvanischen Spirale vermöge ihrer magnetischen Kraft hängender Eisenkern auf eine metallische Feder übt. Nach diesem Prinzip werden sogenannte Ampèremeter gebaut.

Da die moderne Technik galvanische Ströme von fast unbegrenzter Stärke zu bilden vermag, so stellt man auch Elektromagnete von so gewaltiger Kraft her, wie es mit Hilfe der natürlichen Magnete nicht möglich ist. Die meisten der vorerwähnten Untersuchungen, z. B. über den Diamagnetismus, sind deshalb mit Elektromagneten angestellt. Von jenen diamagnetischen Erscheinungen würde man mit Hilfe natürlicher Magnete überhaupt nichts wahrnehmen.

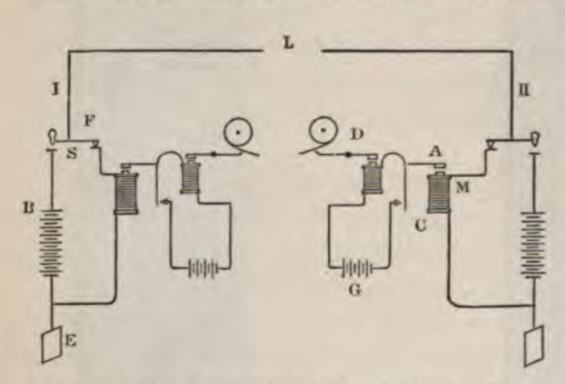


Elektrischer Telegraph. a Anker, e Elektromagnet, f Farbstift, p Papierstreifen. Vgl. Text, S. 348.

Auf den Wirkungen der Elektromagnete beruht unter anderem auch die Erfindung des Telegraphen. Da der elektrische Strom sich mit großer Geschwindigkeit ausbreitet, die zwar in Leitungsdrähten der Ausbreitung im leeren Raum nachsteht, so müssen zwei von demselben Stromkreis umzogene Eisenkerne nach gewöhnlichen menschlichen Begriffen zu gleicher Zeit magnetisch werden, wie groß auch die Entfernung sei, welche zwischen den beiden so entstehenden Elektromagneten liegt. Man kann diese Eigenschaft zu Signalen verwenden, die eine bestimmte, vorher verabredete Bedeutung haben und die Gedanken über eine beliebig große Strecke mit der Geschwindigkeit des Lichtes übertragen, wenn die beiden Orte nur durch einen Draht miteinander verbunden sind. Denn man hatte bald gesehen, daß der zweite Draht, der zu einem geschlossenen Stromkreise gehört, in diesem Fall entbehrlich ist, wenn man seine beiden Enden in die Erde leitet, also eine Erdverbindung herstellt. Die Erde ist gewissermaßen als ein unermeßlich großer Behälter von gebundener Elektrizität zu betrachten. Die Batterie holt den für sie nötigen Teil durch die eine Erdverbindung aus der Erde hervor, wie es ein Schöpfwerk tut, läßt diese Elektrizität nun auf der von der Erde sorgfältig isolierten Leitung arbeiten und gibt sie dann durch die zweite Erdverbindung dem großen Behälter Erde wieder zurück.

Die Zeichen werden in der Regel dadurch gegeben, daß der Eisenkern eines auf der Empfangsstation befindlichen Elektromagneten e, der durch Stromschluß auf der Aufgabestation erregt worden ist, einen über ihm befindlichen eisernen *Anker* a anzieht, der für gewöhnlich durch eine Feder von ihm abgehalten wird. Auf der anderen Seite des Ankers befindet sich ein Farbstift f, der auf einem vorbeirollenden Papierstreifen p die Zeichen niederschreibt (s. die Abbildung, S. 347). Durch einen sofort wieder unterbrochenen Stromschluß entsteht dann ein Punkt, durch einen etwas länger gehaltenen eine Linie. Die Verbindungen solcher Punkte und Linien haben nach einem internationalen Übereinkommen zu dem sogenannten *Morsealphabet* geführt.

Zur Übertragung solcher Zeichen genügen im allgemeinen sehr schwache Ströme, die ein Hundertstel *Ampère* meist nicht überschreiten; aber die Länge der Leitung bietet einen entsprechend großen Widerstand, so daß man bei größeren Entfernungen die Zahl der hintereinander zu schaltenden galvanischen Elemente auch entsprechend steigern muß. Bei sehr langen Linien bedient man sich außerdem eines *Relais*. Man begnügt sich mit einem Strome, der nicht ausreichen würde, den Anker des Schreibapparates zu bewegen, wohl aber einen feiner eingestellten Anker des sogenannten Relais, so daß also der Weg des Ankers von seiner Ruhestellung bis zum Kontakt mit dem Elektromagnet ein viel kleinerer wird. Durch diesen Kontakt wird ein anderer, von einer Lokalbatterie herrührender Strom geschlossen, der nur innerhalb der Station zirkuliert, und dieser erst wirkt zeichengebend auf den Morse-Apparat. Ebenso schließt dann der die Zeichen gebende Taster nur die Lokalbatterie und erregt den Magnet des Relais, das seinerseits erst den Linienstrom schließt. Die betreffenden Verbindungen sind schematisch oben abgebildet. Wird auf der Station I der Taster S niedergedrückt, so sind zunächst alle Apparate dieser Station ausgeschaltet, weil der Kontakt F aufgehoben ist. Der Strom von der Batterie B, der auf einer Seite durch eine Metallplatte E direkt mit der Erde verbunden ist, geht durch die Linie L nach dem Magneten M der Station II, der nun den Anker A anzieht. Dadurch wird der Kontakt C des Relais hergestellt und der Stromkreis der Lokalbatterie G geschlossen. Der Schreiber D gibt dann das entsprechende Zeichen.

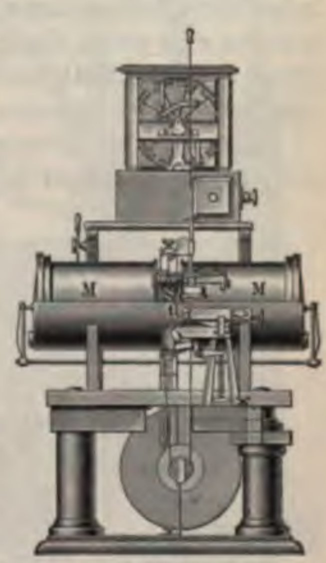


Schema einer elektrischen Telegraphenverbindung.

Man kann das Relais so fein einstellen, daß es schon auf die geringen Stromschwankungen anschlägt, die in einem Mikrophon durch die Schallschwingungen entstehen, welche die Pendelschläge einer Sekundenuhr begleiten. Auf diese Weise hat der Verfasser nur durch Mikrophon, Relais und entsprechenden Linienstrom die astronomische Zeit von Genf nach Wien bei Gelegenheit einer Bestimmung der geographischen Längendifferenz zwischen diesen Orten übertragen.

Trotzdem würde ein solches Relais nicht ausreichen für die außerordentlich kleinen Ströme, die bei der *überseeischen Telegraphie* aus praktischen Gründen zur Anwendung kommen müssen. Man greift hierfür auf den feinfühligen Galvanometer zurück (S. 345), der schon bei dem ersten von Gauß und Weber konstruierten elektrischen Telegraphen, dessen Wirkungsweise wir erst später (S. 355) schildern können, eine wichtige Rolle spielte. Die Ausschläge des Lichtzeigers nach rechts oder nach links, seine kürzeren oder längeren Zuckungen, können ebenso als alphabetische

Zeichen gruppiert werden wie beim Morsetelegraphen. Die folgende Abbildung zeigt Thomsons Heberschreibapparat, der selbst bei jenen äußerst schwachen Strömen ein automatisches Aufzeichnen der Kabeldepesche gestattet. Die Multiplikatorrolle S schwebt an einem feinen Faden zwischen den Polen des großen, vom Kabelstrom umflossenen Elektromagneten M M und wird von den Schwankungen seiner Stromstärke ebenso abgelenkt wie eine Galvanometernadel. Sie nimmt dabei den kleinen Glasheber t mit. Durch eine besondere Vorrichtung spritzt der Heber beständig kleine Tropfen Tinte aus, die auf einen unter ihm vorüberziehenden, den Heber aber nicht berührenden Papierstreifen fallen und dort durch die Bewegungen der Nadel Kurvenlinien bilden, aus deren Höhen und Tiefen die Buchstaben der Depesche abzulesen sind (s. die untenstehende Abbildung).



Thomsons Heberschreibapparat. M Elektromagnet; S Multiplikatorrolle; t Glasheber.

Daß alle telegraphischen Einrichtungen inzwischen sehr wesentliche Vervollkommnungen erfahren haben, ist bekannt. Es gibt Vorrichtungen, wie der auf S. 350 abgebildete **Hughes-Apparat**, auf welchem die alphabetischen Zeichen auf einer Klaviatur angeschlagen und auf der Empfangsstation sofort in gewöhnlichem Typendruck wiedergegeben werden. Ferner sind sinnreiche Vorrichtungen erfunden, die es erlauben, auf ein und demselben Draht mehrere Depeschen zugleich befördern zu können, oder solche, die Originalschriften oder einfache Linienzeichnungen in ihrer ursprünglichen Form übertragen, und vieles andere mehr.

Es mag hier schließlich nur angedeutet werden, daß man die direkten elektromagnetischen Wirkungen früher, ehe man die praktische Verwertbarkeit der Induktionsströme erkannt hatte, die uns gleich beschäftigen sollen, auch zu **Kraftmaschinen** zu verwenden versucht hat. Um eine dauernde Rotationsbewegung zu erhalten, die dann das Schwungrad einer beliebigen Maschine treibt, kann man, wie die obere Abbildung, S. 351, angibt, zwei Elektromagnete abwechselnd erregen, so daß in die Spiralen A, bezw. B einmal der Eisenkern C und darauf der Eisenkern D gezogen wird, die auf diese Weise ganz wie die Kolben einer Dampfmaschine arbeiten und ein Schwungrad L treiben. Die Stromumschaltung wird durch den Mechanismus der Maschine selbst besorgt, ebenso wie die wechselnde Dampfzuführung bei der Dampfmaschine. Man hat noch manche andere derartige Maschine ausgedacht, aber ihre Anwendung in größerem Maßstabe stellt sich als unökonomisch heraus, so daß solche elektromagnetischen Rotationsapparate nur als interessante Spielzeuge gelten können.

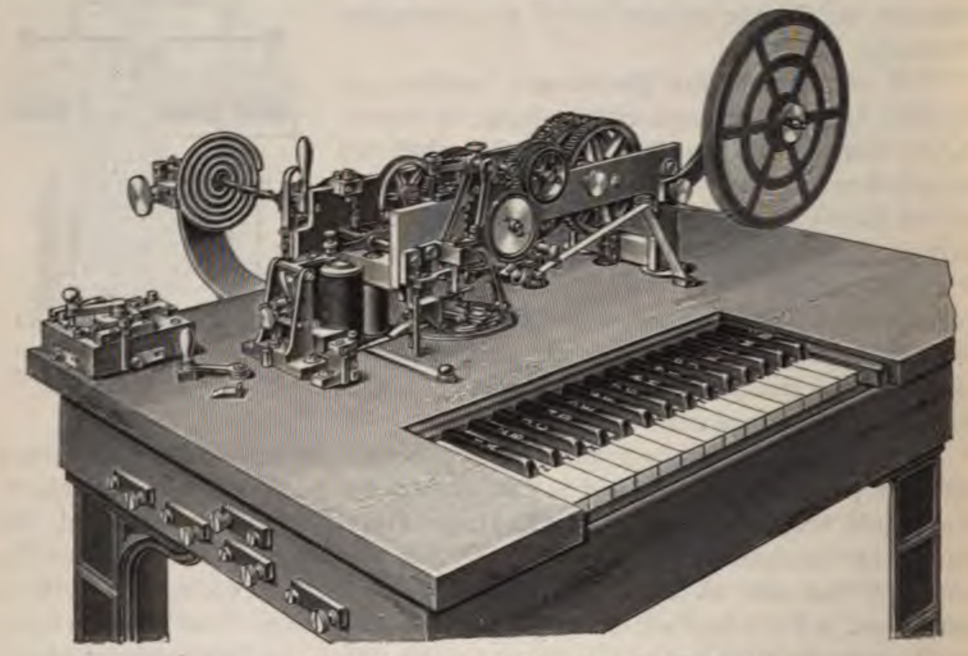
a b c d e f g

Schriftprobe des Heberschreibapparats.

Dagegen haben die elektromagnetischen Erscheinungen dem Astronomen zur Übertragung genauer **Zeitangaben** sehr viel geholfen. Auf keiner Sternwarte fehlt heute mehr der **elektrische Chronograph** (s. die untere Abbildung, S. 351), mit dem man Zeitmomente bis auf weniger als eine Zehntelsekunde durch Stromschluß des Elektromagnets a auf einem vom Uhrwerk e bewegten Papierstreifen i mittels der am Anker b befestigten Stahlspitze s markiert. Entsprechende Vorrichtungen wurden schon bei Besprechung des Pendels (S. 61) erwähnt. Das

Pendel einer astronomischen Uhr kommt bei jedem Ausschlag in elektrischen Kontakt, indem eine feine Spitze in einen Quecksilbernapf taucht. Dadurch wird ebenso wie durch den Telegraphentaster der Anker eines Elektromagnets für einen Augenblick angezogen und macht dabei einen Punkt auf einem vorbeirollenden Papierstreifen. Auf diesem werden also die Sekunden der Normaluhr in bestimmten Zwischenräumen verzeichnet. Neben diesen Punkten kann nun der Beobachter durch Schließen eines zweiten Stromes gleichfalls einen Punkt machen, wenn er ein im Fernrohr gesehenes Ereignis zeitlich festlegen will. Die Lage dieses Punktes ist dann nachträglich bis auf wenige Hundertstel des Abstandes der beiden benachbarten Sekundenpunkte voneinander abzulesen.

Von sehr großer Wichtigkeit für die Erforschung der genauen Gestalt unserer Erde, die auch, wie wir wiederholt sahen, für manche physikalische Fragen Bedeutung hat, ist die



Hughes telegraphischer Apparat. Vgl. Text, S. 349.

Bestimmung des geographischen Längenunterschiedes zwischen entfernt von einander liegenden Sternwarten. Er ist genau übereinstimmend mit dem Unterschiede der beiden astronomischen Ortszeiten, zu welchen man ein und dasselbe himmlische Ereignis an den beiden Orten sieht. Dieser Unterschied wieder ist durch eine Übertragung der Zeit zwischen den beiden Orten gegegeben. Die Übertragung machte aber früher, vor der Erfindung des Chronographen, viel Schwierigkeiten, wenn sie bis zu der erwünschten Genauigkeit ausgeführt werden sollte. Heute geschieht dies einfach dadurch, daß man die Normaluhr der einen Sternwarte über die beide Orte verbindende Telegraphenlinie hinweg auf dem Chronographen der anderen Sternwarte selbsttätig ihre Sekunden eintragen läßt. Man erhält dadurch den Unterschied des Standes der beiden Uhren unmittelbar und also auch den Unterschied der Ortszeiten, wenn man gleichzeitig an beiden Orten durch astronomische Beobachtungen die Abweichung der Uhren von der wahren Zeit bestimmt.

Von der elektrischen Pendeluhr von Hipp, die ohne Gewichte und ohne Räder geht, haben wir schon S. 61 gesprochen. Elektrische Uhren oder auch solche, die zwar durch den gewöhnlichen Antrieb gehen, aber auf elektrischem Wege von einer Zentrale aus gemeinsam reguliert werden, sind in sehr verschiedenen Konstruktionen in Anwendung. Sie werden bei dem immer steigenden Werte der Zeit zu wichtigen Regulatoren unseres gesamten Verkehrswesens.



Pages elektromagnetische Maschine. DC Magnete; AB Multiplikatorrollen; L Schwungrad. Vgl. Text, S. 349.

f) Der Induktionsstrom.

Wie wir gesehen haben, macht ein galvanischer Strom, der einen Eisenkern umkreist, diesen magnetisch. Nach unseren bisherigen Erfahrungen, die uns lehrten, daß eine Wirkung immer eine gleichartige Gegenwirkung hervorruft, und daß die meisten physikalischen Vorgänge umkehrbar sind, können wir von vornherein vermuten, daß umgekehrt ein Magnet in einer Drahtspirale einen galvanischen Strom erzeugt. Um dies durch den Versuch zu beweisen, nehmen wir aus dem Stromkreis, der bisher einen Elektromagnet erregte, die Batterie hinweg, fügen dafür ein Galvanometer (M in der oberen Abbildung, S. 352) ein und ersetzen den unmagnetischen Eisenkern durch einen permanenten Magnet NS. Das Galvanometer zeigt dann zwar ohne weiteres noch keinen Ausschlag. Dies ist auch begreiflich, denn sonst müßten wir mit einer solchen Vorrichtung ein wirkliches Perpetuum mobile bauen können. Der Ausschlag der Galvanometernadel zeigt ja eine vorhandene elektromotorische Kraft an, die aus dieser Anordnung fließen würde, ohne daß irgend ein Teil derselben dabei innere oder äußere Veränderungen erleidet. Jene Kraft würde also ohne Gegenleistung geliefert. Wohl aber zeigt die Nadel jedesmal einen Ausschlag, wenn wir den Magnet innerhalb der Multiplikatorrolle A hin und her bewegen, also der Kombination einen Teil unserer Kraft zur Verfügung stellen. Unsere untere Abbildung, S. 352, gibt an, in welcher Richtung zur Bewegung des Magnets



Elektrischer Chronograph von Fueß. Vgl. Text, S. 349.

die durch ihn hervorgerufenen Ströme fließen. Diese Induktionsströme sind offenbar eine Rückwirkungserscheinung, denn ihre Richtung ist immer derart, daß sie durch ihre eigene Kraft die Bewegung des induzierenden Stromes, also die Bewegung des Magnets selbst, der die Induktion hervorruft, zu hemmen suchen. Der induzierte Strom leistet einen Widerstand gegen den induzierenden, primären Strom.



Magnetinduktion. M Galvanometer; A Multiplikatorrolle; NS Magnet. Vgl. Text, S. 351.

Ehe wir weiter gehen, holen wir an dieser Stelle die Maßbestimmung unserer oft angewandten elektromotorischen Einheit, des Volt, in Einheiten des absoluten Maßsystems nach. Wir nehmen einen Magnet von der auf S. 300 festgesetzten Einheitskraft und halten senkrecht zu seinen Kraftlinien einen geradlinigen Leitungsdraht von 1 cm Länge in einer Entfernung von 1 cm von unserem Einheitsmagnet und bewegen den Draht alsdann senkrecht zu seiner Richtung in 1 Sekunde um 1 cm weiter. Der in diesen Leitungsdraht dadurch induzierte Strom besitzt die elektromotorische Einheitskraft. Für praktische Zwecke ist diese aber viel zu klein, so daß wir erst das Hundertmillionenfache dieser Einheit ein Volt nennen.

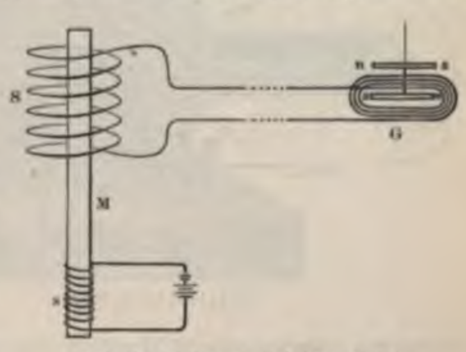
Wir haben eine ganz neue Art von Elektrizitätserzeugung vor uns. Durch Bewegung größerer Materieteile, ponderomotorisch, im Gegensatze zu den Molekularbewegungen, die wir durch Reibung oder durch elektrolytische Berührung hervorriefen, haben wir elektrische Ströme erzeugt, also sichtbare Bewegung direkt in Elektrizität umgewandelt. Schon jetzt können wir vermuten, daß diese Elektrizitätsquelle von allen bisher uns bekannten die praktischste ist, weil sie ohne verlustbringende Zwischenglieder arbeitet. Bei der Reibungselektrizität ging durch die Reibung selbst Kraft verloren; außerdem kann man mit ihr keine großen Elektrizitätsmengen bilden. In den galvanischen Batterien entstehen durch die chemischen Vorgänge Verluste, und das Arbeiten mit ihnen ist umständlich und „unreinlich" wegen der ätzenden Flüssigkeiten, die dabei Verwendung finden. Dagegen ist unsere Maschinentechnik sehr weit darin fortgeschritten, Bewegungen jeder Art zu veranlassen, die nach unseren neuen Erfahrungen unmittelbar in strömende Elektrizität umgesetzt werden können. Wir werden den Bau der sogenannten Dynamomaschinen, welche diesem Zwecke dienen, bald in ihren Hauptzügen kennen lernen (S. 365 u. ff.). Um aber vorher die Eigenschaften des Induktionsstromes noch etwas näher zu studieren, stellen wir einige Experimente mit ihm an.



Richtung des Induktionsstroms zur Bewegung des Magnets. Vgl. Text, S. 351.

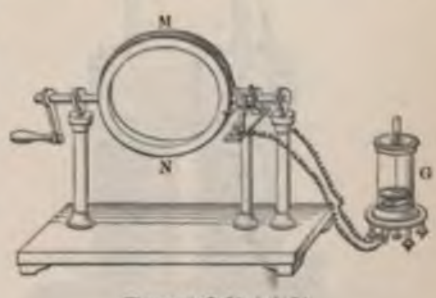
Es wird zu diesem Zweck ein Stab M aus weichem, unmagnetisiertem Eisen auf beiden Seiten mit Spiralen umgeben, deren jede in sich geschlossen ist (s. die obere Abbildung, S. 353). Die eine Spirale s ist mit einer Batterie in Verbindung, die andere S führt zu einem Galvanometer G. Sowie wir den Batteriestrom schließen,

das Eisen also zu einem Elektromagnet machen, zuckt unsere Galvanometernadel; sie stellt sich aber sofort wieder in die Ruhelage zurück, während der galvanische Strom weiter fließt. Der Induktionsstrom hat aufgehört. Die Nadel schlägt aufs neue aus, und zwar in umgekehrter Richtung wie beim Stromschluß, wenn wir die Verbindung mit der Batterie unterbrechen, den Stromkreis öffnen. Induktionsströme entstehen also auch beim Schließen und Öffnen eines galvanischen Stromes, ohne sichtbare Bewegung eines Teiles der Versuchsanordnung. Wir haben uns hier vorzustellen, daß bei der Magnetisierung des Eisens durch den Strom dasselbe geschieht, wie wenn wir einen permanenten Magnet aus großer Entfernung in die Induktionsspirale stoßen und umgekehrt herausziehen. Was wir hier an Kraft für die direkte Bewegung ersparen, brauchen wir für die Erzeugung des galvanischen Stromes. Hiervon werden wir Gebrauch zu machen haben.



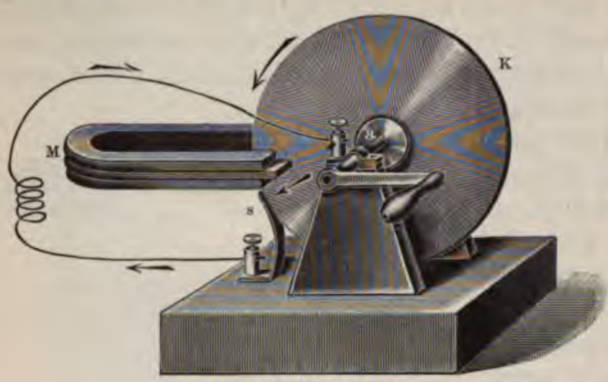
Induktionsstrom. Vgl. Text, S. 352.

Schon wiederholt wurde erwähnt, daß es nur auf die Bewegung eines galvanischen Leiters in einem magnetischen Feld ankommt, um Induktionsströme zu erzeugen, daß es also nicht notwendig der Magnet sein muß, welcher sich bewegt. Wir wissen ferner, daß die Erde selbst ein Magnet ist, und daß uns fortwährend, wo wir auch sind, ein magnetisches Feld umgibt. Es muß demnach die Bewegung eines Leiters allein schon Induktionsströme hervorbringen, was sich auch bestätigt. Richten wir eine Induktionsspirale MN so ein, daß wir sie im Kreise herumdrehen können, wie es aus unserer untenstehenden Abbildung hervorgeht, so zeigt die mit ihr verbundene Galvanometernadel G Ablenkungen, wenn wir den Apparat in Tätigkeit setzen. Daß hier wirklich der Erdmagnetismus die Ursache ist, läßt sich daran zeigen, daß diese Ablenkungen mit der Lage des Apparates gegen die Inklinationsrichtung der erdmagnetischen Kraft wechseln. Dies erscheint uns ohne weiteres notwendig, wenn wir beachten, daß ja auch bei unseren vorangegangenen Experimenten die Lage des Magnets zur Induktionsrolle nicht gleichgültig war. Wir können demnach aus der Wirkung jenes sogenannten **Erdinduktors** die Inklinationsrichtung des Erdmagnetismus bestimmen und finden, daß sie mit der Stellung der Inklinationsnadel übereinstimmt (S. 306). Der Erdinduktor muß in Lagen, die bei seiner Rotation 180° voneinander verschieden sind, entgegengesetzte Induktionsströme erregen, die auch die Galvanometernadel nachweist. Richtet man es nun durch eine bei der Umdrehung selbsttätig wirkende Umschaltung ein, daß die nach dem Galvanometer führende Stromrichtung immer dieselbe bleibt, so gibt der Erdinduktor einen konstanten Strom wie eine kleine galvanische Batterie. **Palmieri** hat es auf diese Weise erreicht, daß eine Kupferrolle nur durch ihre Rotation allein, ohne eine andere Vermittelung oder Verbindung mit einem Eisenkern oder gar einem Magnet, Funken hervorbrachte und Wasser in seine Bestandteile zerlegte. Wir sehen immer mehr, wie **Elektrizität nichts als Bewegung** ist; und da Elektrizität mit Licht, dieses mit



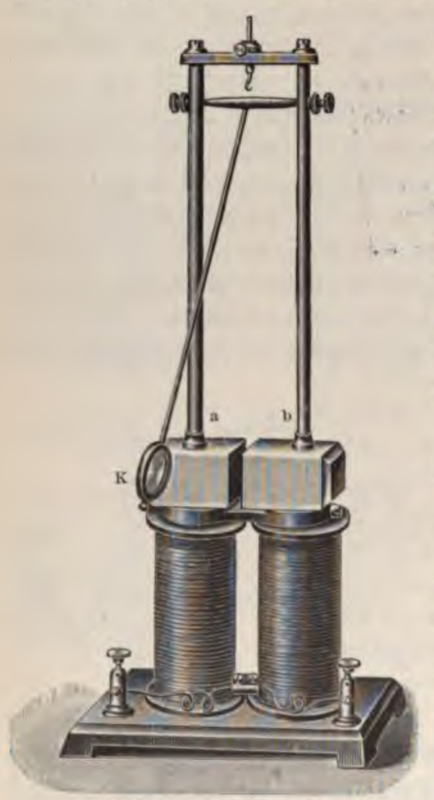
Magnetelektrizität.

Wärme im Wesen übereinstimmt, so erkennen wir mit Verwunderung, wie alle diese so verschiedenartig auftretenden Erscheinungsgruppen Bewegungen ein und derselben Art und ein und desselben Äthers sind, dessen spiralig gewundene Wirbel alles durchdringen.



Rotationsinduktor.

Statt jenes Erdmagnets können wir natürlich zur Bildung eines konstanten Induktionsstromes auch einen künstlichen nehmen. Die betreffende Anordnung geht aus der nebenstehenden Abbildung hervor. Die rotierende Scheibe K besteht aus Kupfer, der Stromkreis wird durch die eine Achse a und durch den Schleifkontakt bei s hergestellt. Durch Drehung der Scheibe zwischen den Polen des Hufeisenmagnets M entsteht ohne weiteres ein konstanter Induktionsstrom, und es ist nicht nötig, bei jeder halben Umdrehung die Stromrichtung wie beim Erdinduktor zu ändern.



Waltenhofens Pendel.

Auf der Rückwirkung so entstehender Induktionsströme beruht ein anderes Experiment, das hier erwähnt werden mag. Bringt man über einer kupfernen Scheibe eine größere Magnetnadel an, so folgt diese, nicht gleich, aber allmählich immer schneller, der Rotation der Scheibe, als ob sie von dem Luftwirbel mitgerissen würde, der durch jene Rotation entsteht. Um diese Erklärung auszuschließen, trennt man Magnet und Scheibe durch eine Glasplatte. Die Erscheinung bleibt aber die gleiche. Es sind also die jenen Luftwirbeln durchaus vergleichbaren elektrischen Wirbel allein, die die Bewegung der Nadel bewirken.

Sehr deutlich ist diese Rückwirkung bei dem sogenannten Waltenhofenschen Pendel zu erkennen, das hierneben abgebildet ist. Ein Stück Kupfer K pendelt zwischen den Polen ab eines kräftigen Elektromagnets hin und her. Bei Erregung des Magnets bleibt das schwere Stück Kupfer, obgleich es mit großer lebendiger Kraft zwischen den Polen bei seiner Pendelbewegung hindurchstrebt, zwischen diesen festgehalten, als ob es hier eine zäh widerstehende Masse überwinden sollte, oder als ob es Eisen statt Kupfer wäre.

Induktionsströme waren es, welche die Zeichen des ersten elektrischen Telegraphen verursachten, der regelmäßig und sicher arbeitete. Gauß und Weber (s. die Abbildungen, S. 355 und 356) in Göttingen, der erstere Direktor der Sternwarte, der andere Leiter des physikalischen Instituts, hatten 1833 diesen Telegraphen zwischen ihren beiden





Fernsprechzentrale Berlin.
Nach Photographie.

wissenschaftlichen Anstalten, die einige Kilometer voneinander entfernt liegen, eingerichtet. Der Zeichengeber bestand aus einer Induktionsspule I, die über dem einen Pol eines permanenten Magnets M hin und her geschoben werden konnte. Die dadurch entstehenden Ströme bewegten auf der Empfangsstation die Nadel eines Galvanometers G, deren Ausschläge mittels Spiegels S, Fernrohrs und Skala abgelesen wurden (f. die Abbildungen, S. 357). Durch einen Kommutator, Stromwender K, wurde die Richtung des Stromes umgekehrt, wodurch man die Nadel nach rechts und nach links ausschlagen ließ und auf diese Weise ein Buchstabensystem ähnlich dem des Morse-Alphabetes ausbildete. Dieser Apparat arbeitete also ohne Batterie oder sonstige Elektrizitätsquelle und stand jederzeit bereit. Die beiden Freunde, deren Forscherarbeit durch die gegenseitige Anregung, die sie austauschten, so wertvolle Früchte getragen hat, ließen ihre Gedanken auf dieser ersten Telegraphenlinie, deren eines Ende an der Sternwarte bis heute noch erhalten ist (f. die Abbildung, S. 358), ein Jahrzehnt lang hin und her fliegen, ehe die Menschheit daran dachte, diese heute die Welt beherrschende Erfindung zu verwerten. Es ist wahrhaft herzbewegend, den großen Denker Gauß über den Wert dieser Erfindung und ihre Zukunft die geradezu prophetischen Betrachtungen anstellen zu sehen, die er in einem Brief an Schumacher 1835 in recht pessimistischer Laune über die Geringfügigkeit der ihm für solche grundlegend wichtigen Arbeiten zu Gebote stehenden Mittel ausspricht (Riecke, Experimentalphysik II, S. 224):



Karl Friedrich Gauß. Vgl. Text, S. 354.

„In anderen äußeren Verhältnissen als die meinigen sind, ließen sich wahrscheinlich auch für die Sozietät wichtige und in den Augen des großen Haufens glänzende praktische Anwendungen daran knüpfen. Bei einem Budget von 150 Talern jährlich für Sternwarte und magnetisches Observatorium zusammen lassen sich freilich wahrhaft großartige Versuche nicht anstellen. Könnte man aber darauf Tausende von Talern wenden, so glaube ich, daß z. B. die elektromagnetische Telegraphie zu einer Vollkommenheit und zu einem Maßstab gebracht werden könnte, vor der die Phantasie fast erschrickt. Der Kaiser von Rußland könnte seine Befehle ohne

23*

Zwischenstation in derselben Minute von Petersburg nach Odessa, ja vielleicht nach Kiachta geben, wenn nur der Kupferdraht von gehöriger (im voraus scharf zu bestimmender) Stärke gesichert hingeführt und an beiden Endpunkten mächtige Apparate und gut eingeübte Personen wären. Ich halte es nicht für unmöglich, eine Maschinerie anzugeben, wodurch eine Depesche fast so mechanisch abgespielt würde, wie ein Glockenspiel ein Musikstück abspielt, das einmal auf eine Walze gesetzt ist. Aber bis eine solche Maschinerie allmählich bis zur Vollkommenheit gebracht würde, müßten natürlich erst viele kostspielige Versuche gemacht werden, die freilich z. B. für das Königreich Hannover keinen Zweck haben. Um eine solche Kette in einem Schlag bis zu den Antipoden zu haben, wäre für 100 Millionen Taler Kupferdraht vollkommen ausreichend, für eine halb so große Distanz nur ein Viertel soviel, und so im Verhältnis des Quadrates der Strecke."



Wilhelm Eduard Weber. Vgl. Text, S. 354.

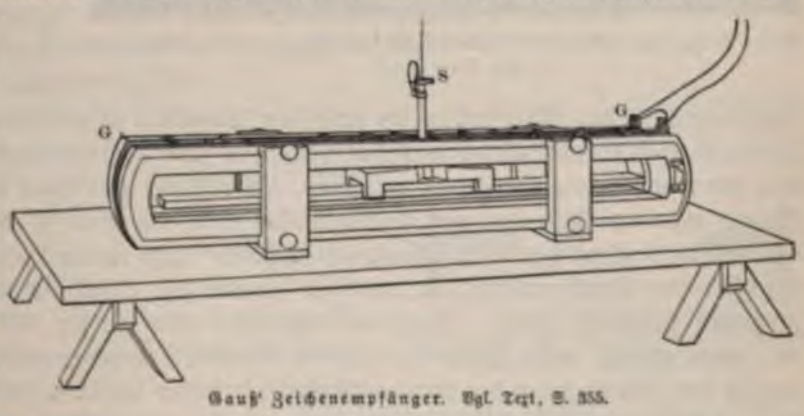
Ein Vielfaches von jenen 100 Millionen Talern, die Gauß als eine erschreckende Ausgeburt der Phantasie betrachtete, sind bis heute auf jenes Netz von Telegraphenlinien verwendet worden, die unsern Weltkörper wie ein Spinngewebe umgeben! Die unterseeischen Kabel, die uns heute mit den Antipoden verbinden, haben allein eine Länge von rund 300,000 km; sie würden also $7^1/_2$ mal um die ganze Erde zu schlingen sein, und der für sie benötigte Kostenaufwand beträgt ungefähr das Dreifache jener 100 Millionen Taler. Gerade für die Überwindung dieser größten Entfernungen ist man, wenigstens für den Empfangsapparat, zu der Gauß-Weberschen Anordnung der beiderseits ausschlagenden Galvanometernadel zurückgekehrt. Wie viele findige Ingenieure haben sich bei der Aneignung und beim Ausbau dieser grundlegenden Erfindung reiche Schätze erworben, während die beiden Göttinger Gelehrten in ihrer bescheidenen Weltzurückgezogenheit weiter dem Urgrunde der Erscheinungen nachspürten, ohne jemals an die Erwerbung materieller Güter durch ihre bahnbrechende Geisteskraft zu denken! Freilich, im Jahre 1899 hat man dem glänzenden Zweigestirn am Himmel der wissenschaftlichen Welt ein gemeinsames Denkmal gesetzt. Aber es ist beschämend, hinzufügen zu müssen, daß es der größten Anstrengungen bedurfte, die Mittel dafür zusammenzubringen. Anderseits

soll hier nicht unerwähnt bleiben, daß **Werner von Siemens**, der mit seinem Generalstab von Brüdern wohl von allen Telegraphenbauunternehmern die größten Leistungen aufzuweisen hat — die durch ihn gelegten oberirdischen Telegraphenlinien würden allein schon viermal um den Äquator der Erde gewunden werden können, wozu noch etwa 15,000 km unterseeische Kabel kommen — durch reiche Mittel in Berlin ein Institut begründen half, die **Physikalische Reichsanstalt**, durch deren Tätigkeit es in Zukunft nach Kräften vermieden werden soll, daß wichtige Gedanken auf physikalischem Gebiete nur wegen mangelnder Mittel nicht weiter verfolgt werden können, wie es unter den Händen der beiden genialen Göttinger Forscher so lange Zeit hindurch eben mit der Erfindung dieses elektrischen Telegraphen der Fall war.



Gauß' Zeichengeber.
Vgl. Text, S. 355.

Induktionsströme sind es auch, welche heute das gesprochene Wort ohne Übersetzung vom Mund zum Ohr über einen ganzen Kontinent hinweg durch das **Telephon** vermitteln, das dadurch zum vollkommensten aller Telegraphen geworden ist. Seine Erfindung verwirklicht wahrhaft Märchenträume und ist um so mehr angetan, unsere Bewunderung zu erregen, als die Konstruktion dieses wundertätigen Instruments eine ganz erstaunlich einfache ist. Wie der Gauß-Webersche Telegraph bedarf auch das Telephon, abgesehen von seiner Verbindung mit dem Mikrophon, keines von außen in seine Leitungen eingeführten Stromes. Die Apparate beider Stationen, der sprechenden wie der hörenden, sind auch während ihrer Tätigkeit genau übereinstimmend, wenn wir von denjenigen Veränderungen ihrer Form absehen, die durch den modernen Großbetrieb der Telephonverbindungen bedingt wurden. In einer Holzfassung von der bekannten Form befindet sich der Länge nach ein Stabmagnet (A in unserer oberen Abbildung, S. 359), vor dessen einem Pol eine leicht vibrierende eiserne Membran pp ausgespannt ist, die jedoch den Magnet, der auf derselben Seite von einer Induktionsspule BB umgeben ist, nicht berühren kann. Beide Spulen, die des Sprech- und des Hörapparates, sind miteinander durch die Drähte DD leitend verbunden (s. die untere Abbild., S. 359). Das ist alles, was nötig ist, um die menschliche Stimme mit all ihren Feinheiten, mit der Seele, die sie umhüllt, über weite Länderstrecken hinwegzutragen. Sobald man gegen den einen Apparat spricht, wird die Membran durch die Luftwellen in die gleichen Schwingungen gebracht wie unser Trommelfell (S. 148), das diese Wellen für uns in hörbare Lauteindrücke übersetzt. Die Schwingungen der Telephonmembran, die durch ihre Nähe zu



Gauß' Zeichenempfänger. Vgl. Text, S. 355.

dem Stabmagnet selbst magnetisch wird, erzeugen in der Induktionsrolle Ströme in derselben Weise, wie wir es auf S. 351 beschrieben haben. Genau in dem Rhythmus der Schallwellen des gegen den ersten Apparat gesprochenen Wortes schwellen jene sehr kleinen Ströme an und ab und teilen sich durch die Leitung der zweiten Spirale und dem Hörapparat auf der anderen Station mit; sie erhöhen oder vermindern dadurch den Magnetismus des zweiten Stabmagneten genau nach den Schwankungen des ersten Magnets. Die vor ihm ausgespannte Membran muß deshalb dieselben Schwingungen machen wie die der Sprechstation, denn sie versetzt die umgebende Luft in durchaus die gleichen Schwingungen, wie es das direkt gesprochene Wort tut, so daß unser Trommelfell dieselben Eindrücke wieder erhält und auf die Nervenapparate unseres Ohres überträgt.

Erster Telegraph von Gauß und Weber an der Sternwarte in Göttingen. Vgl. Text, S. 355.

Diese erste, von **Bell** gewählte Form des Fernsprechers wird auch heute noch vielfach angewendet, obgleich später namentlich durch W. von Siemens (s. die Abbildung, S. 360) mancherlei andere Formen eingeführt wurden, deren physikalisches Prinzip aber stets dasselbe ist. Auf S. 361 ist das Innere eines der gebräuchlichsten Telephongehäuse und seine bekannte äußere Form dargestellt. Für die Praxis treten noch Nebenapparate hinzu. Zunächst sucht man durch das **Mikrophon** die durch den Widerstand in den Stromleitern verloren gegangene Kraft teilweise wieder zu ersetzen. Zu diesem Zweck muß der Sprechapparat eine von dem Hörer verschiedene Einrichtung annehmen. Man spricht nicht gegen die Eisenmembran, sondern gegen ein Mikrophon von gleicher Wirkungsart, wie es auf S. 340 beschrieben ist, nur daß die Kohlenspitzen durch eine Kohlengrusschicht ersetzt werden. Diese liegt unmittelbar hinter der Sprechmembran, die aus einer dünnen, den Schall als Resonanzboden verstärkenden Holzplatte besteht. Durch den Kohlengrus wird von der **Mikrophonbatterie** ein Strom geschickt, dessen Stärke sich durch die Schallerschütterungen ändert. Dieser Strom umgibt den Stabmagneten der Empfangsstation wie früher der bloße Induktionsstrom und übt nun hier entsprechend stärkere Wirkungen aus. Damit die Mikrophonbatterie sich nicht unnötig schwächt, soll sie nur während der Benutzung der Einrichtung geschlossen sein. Durch das „Anhängen“ des Hörtelephons F wird die Ausschaltung bei A automatisch bewirkt, wie dies aus der unteren Abbildung, S. 361, zu ersehen ist. Die sehr schwachen Induktionsströme,

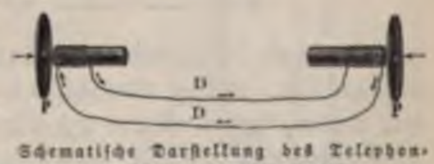
die nur durch die Vibrationen der vorhin beschriebenen Eisenmembran entstehen, würden eine Rückleitung, also zwei Leitungsdrähte zwischen den beiden Stationen, unbedingt nötig machen, wodurch sich die Anlage gegenüber den Telegraphenlinien wesentlich verteuerte. Durch die Einführung aber des Mikrophonstromes, der aus einer Batterie wie der Telegraphenstrom geschöpft wird, genügt auch für die gewöhnlichen Fernsprechverbindungen nur ein Draht; die Rückverbindung wird wieder, wie auf S. 347 dargestellt wurde, durch Erdschluß herstellt. Nur für die Fernsprechverbindungen zwischen weit entfernten Orten muß man sich doch wieder einer Doppelleitung bedienen, weil der Erdboden dieser beiden Orte niemals gleichmäßig mit elektrischer „Flüssigkeit“ angefüllt ist, so daß von der einen oder anderen Seite ein vorhandener Überdruck Ströme durch die Telephonleitungen fließen lassen müßte, die als Nebengeräusche allzu störend empfunden würden. Auch in den Telegraphenleitungen beobachtet man solche Erdströme, die indes hier erst störend wirken, wenn sie so stark werden, daß sie die Anker der Morse-Apparate bewegen. Dies beobachtet man häufig bei jenen schon auf S. 310 erwähnten „magnetischen Gewittern“, die dadurch kenntlich werden, daß zugleich große Nordlichter in den Polarregionen aufflackern und die Magnetnadeln meist über die ganze Erde hinweg unruhig werden. Es sind schon so mächtige und andauernde Erdströme aufgetreten, daß die telegraphische Verständigung über weite Ländergebiete hin stundenlang unmöglich wurde, ohne daß dabei sonst in der Natur eine besondere Aufregung zu bemerken war. Durch die Rückleitung werden diese Erdströme ausgeschlossen, weshalb es nicht zu verwundern ist, daß die telephonische Verständigung zwischen den Städten oft eine weit bessere ist als innerhalb desselben Stadtbezirkes.



Querschnitt von Bells Fernsprecher. Vgl. Text, S. 357.

Die Telegraphenströme müssen wegen der von ihnen zu leistenden größeren Arbeit an den Schreibapparaten stärker sein als die Mikrophonströme der Fernsprechverbindungen. Da zwei nebeneinander hergehende Ströme ebenso eine Induktionswirkung aufeinander üben wie zwei Magnete, worauf wir noch näher eingehen (S. 361), so stören sich die beiden Arten von Verbindungen. Man muß darum die Telegraphenleitungen von dem Leitungssystem der Fernsprechnetze möglichst getrennt halten.

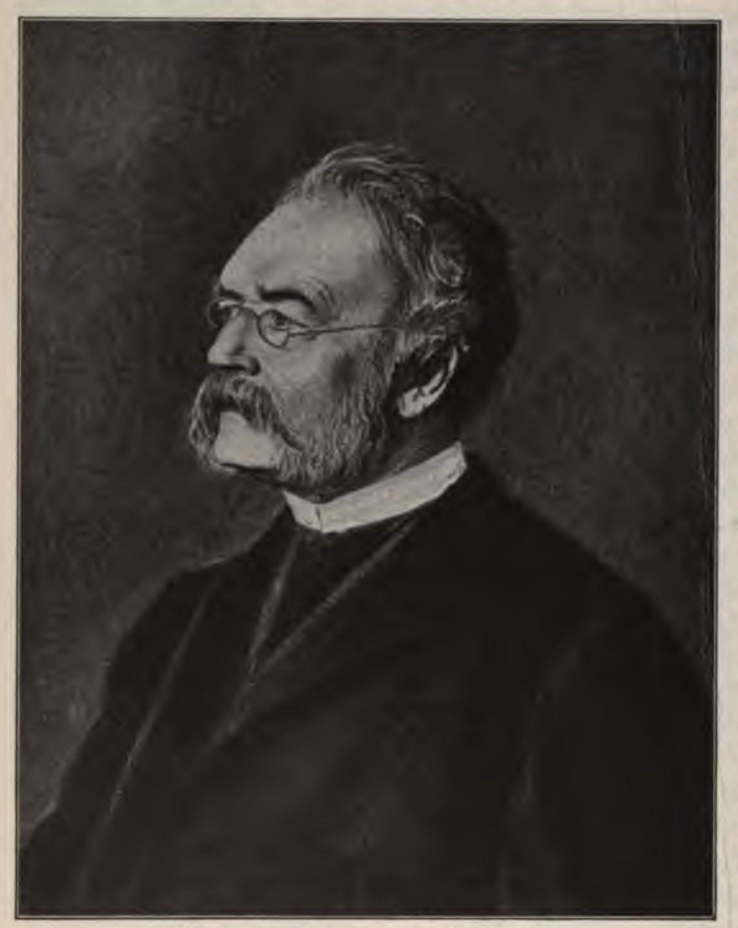
Um die zweite Station davon zu verständigen, daß auf der ersten ein gemeinsames Gespräch gewünscht wird, hat man ein unmittelbar hörbares Zeichen zu geben. Die Schallwirkungen des Telephons allein würden zu gering sein, um aus größerer Entfernung noch wahrgenommen zu werden. Man hat deshalb in die Fernsprechverbindung ein Läutewerk (s. die obere Abbildung, S. 362) eingeführt, das durch den Druck auf einen Knopf mit der Mikrophonbatterie in Verbindung gebracht wird. Dieses Läutewerk ist genau so eingerichtet wie die elektrischen Hausglocken, deren man sich ja heute allgemein bedient. Durch den Anker A eines Elektromagnets M wird der Klöppel K einer Glocke G in Bewegung gesetzt, während gleichzeitig der Strom, welcher von d_1 durch die Spule des Elektromagnets, von dort über c nach A und über F durch den Draht d_2 wieder zur Batterie geht, wegen der Aufhebung des



Schematische Darstellung des Telephon-Prinzips. Vgl. Text, S. 357.

Kontaktes von A mit der Feder F wieder ausgeschaltet wird; der Magnet läßt den Anker wieder los, schaltet dabei den Strom aufs neue ein, zieht damit den Anker an und so fort, sodaß der Klöppel in pendelnder Bewegung erhalten wird und die Glocke ertönen läßt.

Die Batterie für solche Läutewerke muß bei der Länge der Verbindungen in einer größeren Stadt wesentlich stärker sein, als man sie für das Mikrophon braucht. Deshalb hat man sie in neuerer Zeit vielfach durch einen Induktionsapparat ersetzt, bei dem die Ströme durch Gegeneinanderbewegung von zwei Magneten durch Kurbeldrehung mit der Hand erzeugt werden (s. die untere Abbildung, S. 362). Hier wird also die früher dem Teilnehmer in der Batterie zur Verfügung gestellte Kraft von seinen eigenen Muskeln geliefert.



Werner von Siemens. Vgl. Text, S. 358.

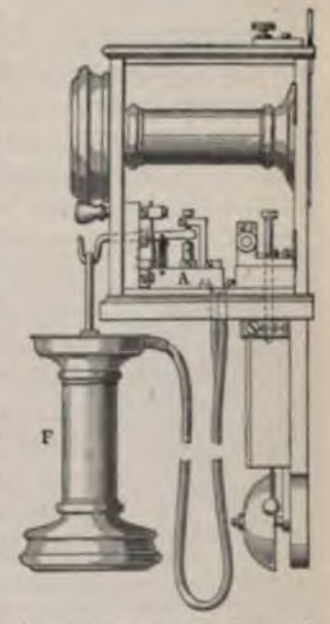
Von einer Fernsprecheinrichtung verlangt man, daß jeder ihrer Teilnehmer mit jedem anderen nach Belieben sprechen kann. Es muß deshalb eine **Zentrale** geschaffen werden, die die verschiedenen Verbindungen nach Wunsch herstellt. Alle Leitungen vereinigen sich in dieser Vermittelungsstelle und endigen hier in sogenannten **Klappenschränken** (s. die Abbildung, S. 363). Wie hier die Verbindungen der einzelnen Nummern durch zwei Stöpsel ab, die die Enden eines Drahts bilden, hergestellt werden, ist wohl im Prinzip unmittelbar klar. Mit den Einzelheiten dieser Einrichtungen, an die immer mehr Ansprüche gestellt werden, können wir uns hier nicht befassen. Unsere bei S. 355 beigeheftete Tafel „Die Fernsprechzentrale in Berlin" gewährt einen Einblick in ein modernes Fernsprechamt.

Da wir gesehen haben, daß eine von einem galvanischen Strom durchflossene Spirale in allen Stücken wie ein Magnet wirkt, so verstehen wir ohne weiteres, daß wir sie wie einen solchen gebrauchen können, um in einer anderen Spirale Induktionsströme zu erzeugen. In der Tat gelingen alle die auf S. 351 u. ff. geschilderten Versuche mit zwei Drahtrollen so gut wie mit einem Magnet und seiner Induktionsrolle. Man nennt aber diese Wirkung im

Gegensatze zu der bisher betrachteten Magnetinduktion die Volta-Induktion. Schieben wir z. B. eine vorher stromlose Rolle A über einer von einem galvanischen Strom durchflossenen B hin und her, so entstehen dadurch Induktionsströme wie durch die Bewegung eines Magnets (s. die obere Abbildung, S. 364); oder wickeln wir um die galvanisch zu erregende Spirale ein für allemal in fester Verbindung eine Induktionsspirale, so entsteht in dieser jedesmal ein Strom, wenn wir in der anderen den galvanischen Strom schließen oder unterbrechen, ebenso wie wir es bei der Verbindung mit dem Elektromagnet auf S. 352 wahrnahmen. Solange aber der galvanische, „primäre" Strom gleichmäßig fließt, ist kein Induktionsstrom vorhanden. Wollen wir also durch eine solche Anordnung einen möglichst kräftigen Induktionsstrom erzielen, so müssen wir den primären Strom möglichst schnell hintereinander schließen und wieder unterbrechen. Wir erreichen dies durch eine Vorrichtung, die der des vorhin beschriebenen Läutewerkes im wesentlichen gleich ist. In der primären Spule befindet sich ein durch den Strom magnetisierter Eisenstab, welcher ein an einer Metallfeder befindliches kleines Stück Eisen, durch das die Verbindung mit der Batterie hergestellt wird, von der Verbindungsstelle abzuziehen sucht; dadurch wird der Strom geöffnet, die Feder schnellt zurück, noch ehe sie den Elektromagnet erreicht hat, schließt den Strom wieder und so fort, so daß ein sehr schnelles Vibrieren der Feder und ebenso schnelle Stromunterbrechungen entstehen. Man nennt eine solche Vorrichtung einen **Unterbrecher**. Eine vollständige Anordnung der beschriebenen Art, bestehend aus der Drahtrolle für den primären Strom und der außen sie umschließenden Induktionsrolle, dem Eisenkern und dem Unterbrecher, nebst gewissen verstärkenden Vorrichtungen, auf die wir nicht näher eingehen, heißt nach ihrem Erfinder ein **Ruhmkorffscher Induktor** oder auch ein Funkeninduktor, der eigentümlich verzweigte Funkenbündel aussendet, wie sie die untere Abbildung, S. 364, zeigt. Er ist ein wichtiges, ja unentbehrliches Hilfsmittel für viele Versuche geworden, insbesondere bildet er die Stromquelle für die Erzeugung der Röntgenstrahlen. In dem diese Erscheinung behandelnden Kapitel ist auf S. 402 ein solcher Funkeninduktor abgebildet.



a Fernsprechgehäuse mit angehängten Fernhörern der Reichstelegraphenverwaltung. b Hörer. Vgl. Text, S. 358.



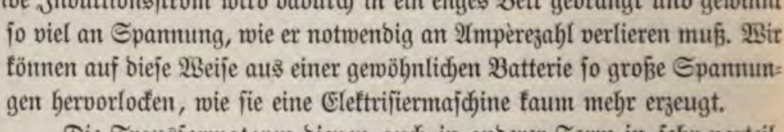
Längsschnitt durch Siemens' Fernsprecher. Vgl. Text, S. 358.

Ohne weiteres mag es unverständlich sein, weshalb man diesen Umweg zur Bildung eines Induktionsstromes wählt, da man den primären galvanischen Strom direkt zur Verfügung hat. Der sekundäre Strom muß also andere Eigenschaften haben als der primäre. Eine derselben springt sofort in die Augen.

Wie schnell auch die Unterbrechungen stattfinden mögen, sie verursachen immer ein Auf- und Abschwellen und ein beständiges Hin- und Rückwärtsfließen des Stromes; denn der Öffnungs- und der Schließungsstrom haben entgegengesetzte Richtungen (s. S. 353). Der zwar für unser Beobachtungsvermögen gleichmäßig fließende Induktionsstrom besteht aus einer großen Anzahl von getrennten Impulsen.

Klingel für Fernsprechbetrieb. Vgl. Text, S. 359.

Diese Eigenschaft des Induktors ist es indes nicht, die seinen besonderen Wert ausmacht. Er ist in der Hauptsache ein „Transformator" der elektrischen Kraft. Wir kennen den Nachteil der galvanischen Batterien, daß sie nur eine geringe Spannung liefern, während große Spannungen für viele Versuche, z. B. für Funkenentladungen, nötig sind. Will man sich von den bei feuchter Luft oft recht „launischen" Elektrisiermaschinen unabhängig machen und die ebenso konstante wie bequeme Stromquelle einer galvanischen Batterie auch zu solchen Versuchen mit hohen Spannungen verwenden, so muß man ein Mittel finden, auf Kosten der Ampèrezahl des Batteriestromes die Voltzahl zu vergrößern, d. h. seine Kraft zu transformieren. Das Ohmsche Gesetz (S. 335) gibt hier einen Fingerzeig, da es unter anderem sagt, daß ein gleichgroßer Strom in einem dünneren Leiter eine höhere Spannung hat als in einem dickeren. Hier einfach den Schließungsbogen der Batterie mit einem dünneren Draht zu versehen, würde aber nichts nützen, weil der durch ihn geleistete Widerstand die Arbeit der Batterie in entsprechendem Maße aufhebt. Jetzt sind es die molekularen Elektrisiermaschinen, die streiken, wie vorhin unter Umständen unsere größeren Maschinen. Anders verhält es sich, wenn wir dem primären Stromkreis durch entsprechend starke Drähte seine volle Entwickelungsfreiheit lassen, dagegen der Induktionsrolle möglichst dünne und dafür um so längere Drähte geben. Der entstehende Induktionsstrom wird dadurch in ein enges Bett gedrängt und gewinnt so viel an Spannung, wie er notwendig an Ampèrezahl verlieren muß. Wir können auf diese Weise aus einer gewöhnlichen Batterie so große Spannungen hervorlocken, wie sie eine Elektrisiermaschine kaum mehr erzeugt.

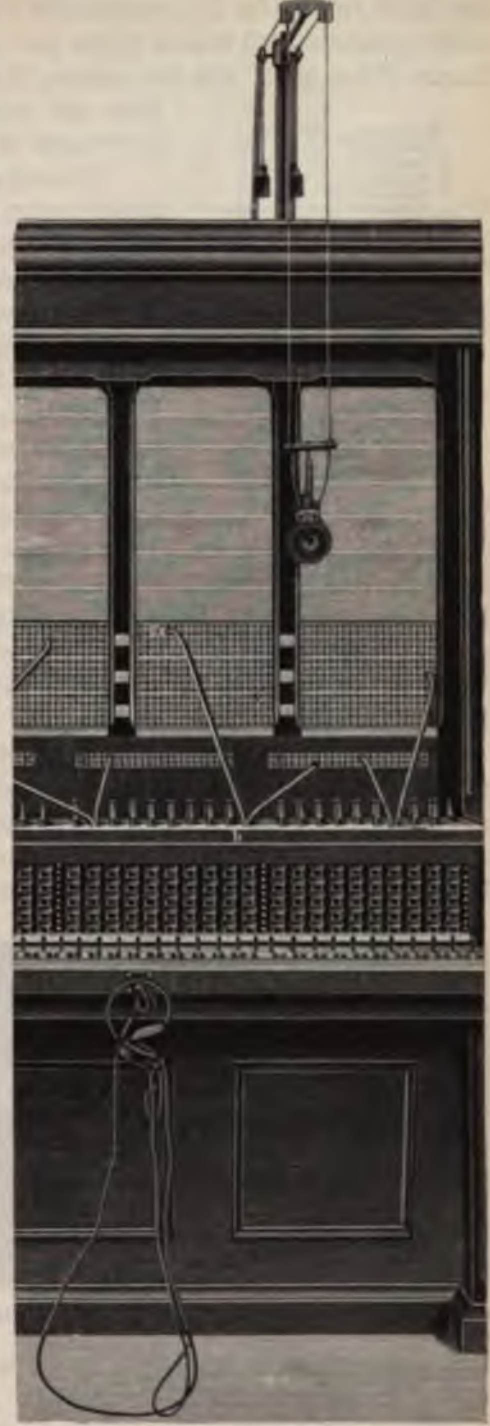




Kurbel zur Erzeugung des Induktionsstroms für Fernsprechbetrieb. Vgl. Text, S. 360.

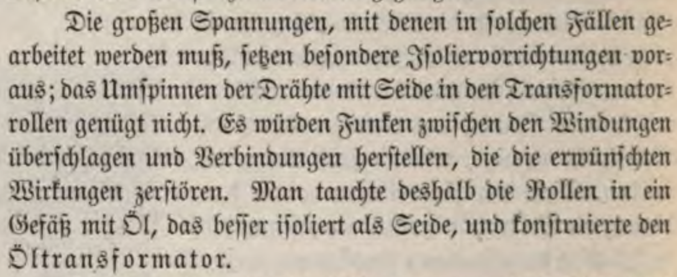
Die Transformatoren dienen auch in anderer Form in sehr vorteilhafter Weise der sogenannten Kraftübertragung durch den elektrischen Strom. Wir haben schon wiederholt gesehen, daß die Induktionsströme uns die Möglichkeit geben, aus mechanischer Kraft Elektrizität zu gewinnen. Die Natur bietet nun mechanische Kraft an vielen Orten dar, namentlich da, wo Wassermassen am schnellsten vorwärts drängen, wo der Stromdruck, die Spannung, „Voltzahl", am größten ist, also bei den Stromschnellen und Wasserfällen. Ist dann auch die Strombreite, die Ampèrezahl, eine große, so bieten sie für den Menschen eine fast unerschöpfliche Kraftfülle dar. Dies trifft z. B. am Niagara, dessen Fälle eine Breite von mehreren Kilometern haben, in imposantem Maß zu (vgl. die Tafel „Der Niagarafall" bei S. 199). Längst verwendet man diese Kräfte durch Mühlen und andere Triebwerke, die man in der Nähe der Stromläufe errichtet hat.

Wo man aber eine ausgiebigere Verwendung für diese natürlichen Kräfte hätte, in den großen Städten, ist solche Kraftquelle meist nicht in der Nähe, und direkte Wasserkraftleitungen werden zu kostspielig. Da hilft nun in neuerer Zeit die Elektrizität, die Allerweltsdienerin, in vorteilhafter Weise aus. Wie man in den Dynamomaschinen, die man direkt an ein Mühlrad koppeln könnte, aus einfacher Bewegung Elektrizität erzeugt, wird sogleich dargestellt werden. Diese Maschinen können wieder dazu dienen, die Elektrizität in Kraft umzusetzen, d. h. in Fabriken die besonderen Zwecken angepaßten Maschinen oder im Hause des kleinen Gewerbsmannes eine Drehbank in Bewegung zu setzen. Für diese Zwecke ist eine möglichst große Kraft, eine hohe Ampèrezahl überzuleiten; hohe Spannungen gebraucht man hierfür nicht. Dies setzt wieder die Notwendigkeit sehr starker und deshalb für eine lange Leitung sehr kostspieliger Verbindungsdrähte zwischen der Kraftquelle und den Betriebsstellen voraus, und die Verbindung würde dadurch in den meisten Fällen noch teurer werden wie eine Wasserleitung. Nun aber kann man durch einen Transformator gleich bei der Stromquelle die Stromstärke hauptsächlich in Spannung verwandeln und den Strom auf einem dünnen Draht nach der Betriebsstelle leiten, hier wieder durch einen umgekehrt wirkenden Transformator die hohe Voltzahl in Ampère umsetzen und so schließlich zu der gewünschten Arbeitsleistung in die Kraftmaschinen strömen lassen. Auf diese Weise hat man während der elektrotechnischen Ausstellung zu Frankfurt im Jahre 1891 einen Teil der Wasserkraft des Neckars für die Zwecke der Ausstellung benutzt. In Lauffen am Neckar erzeugte eine Wasserturbine eine Kraft von 300 Pferdestärken, durch welche eine Dynamomaschine getrieben wurde, die 4000 Ampère bei einer Spannung von 55 Volt lieferte. Diese wurden durch einen Transformator in einen Strom von 27,000 Volt und 8 Ampère verwandelt und über 175 km auf Drähten von



Klappenschrank zur Vielfach-Schaltung.
Vgl. Text, S. 360.

der Stärke gewöhnlicher Telegraphendrähte bis Frankfurt geleitet. Dort wurde der Strom wieder zurückverwandelt in einen solchen von 100 Volt Spannung, wonach er noch etwa 2000 Ampère Stärke hatte. Von den ursprünglichen 220,000 Watt waren also auf dem langen Wege und durch die verschiedenen Übertragungen nur etwa 20,000 oder 10 Prozent verloren gegangen.

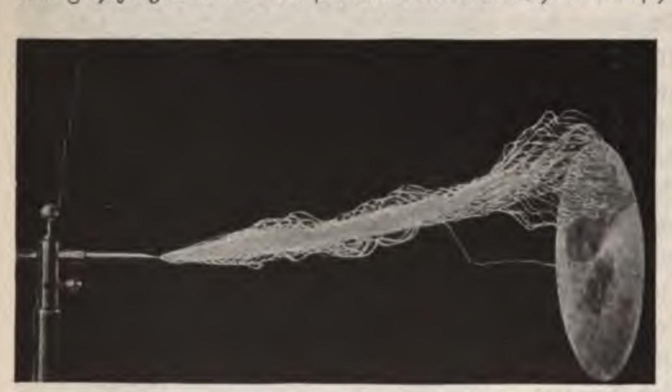


Volta-Induktion.
Vgl. Text, S. 361.

Die großen Spannungen, mit denen in solchen Fällen gearbeitet werden muß, setzen besondere Isoliervorrichtungen voraus; das Umspinnen der Drähte mit Seide in den Transformatorrollen genügt nicht. Es würden Funken zwischen den Windungen überschlagen und Verbindungen herstellen, die die erwünschten Wirkungen zerstören. Man tauchte deshalb die Rollen in ein Gefäß mit Öl, das besser isoliert als Seide, und konstruierte den Öltransformator.

Die Anwendung der Kraftübertragung mittels Elektrizität macht in der Neuzeit sehr große Fortschritte. Man ist heute im stande, eine Kraft von 10,000 Pferdestärken auf 3 Drähten von Bleistiftstärke über 300 km hinweg mit einem Verlust von nur 10 Prozent zu leiten. In Deutschland und Österreich werden nach v. Miller auf diese Weise bereits 180,000 Pferdestärken übertragen, in der ganzen Welt vielleicht 2 Millionen. Was ist dies aber im Vergleich zu den ganz unermeßlichen Kräften, die in der Natur noch unbenutzt zur Verfügung stehen! Man hat z. B. berechnet, daß die Ebbe- und Flutbewegung an den Küsten Frankreichs allein 10 Millionen Pferdestärken liefern würde.

Auch bei den elektrischen Bahnen, die in immer bedeutenderen Dimensionen in Aufschwung kommen, spielt die Umsetzung der elektrischen Kraft in verschiedene Spannungen eine ausschlaggebende Rolle, da man auf den weiten Strecken, welche sie heute schon durchfahren, mit dünnen Stromzuführungsdrähten auskommen kann, indem man deren hohe Spannung in dem Fahrzeug wieder in die für den Betrieb der Dynamomaschinen passendste zurückverwandelt, deren Rotation den Wagen in Bewegung setzt. Wir geben auf unserer beigehefteten Tafel „Elektrische Straßenbahnen“ die Ansichten verschiedener moderner Straßenbahnen mit elektrischem Betrieb. In neuester Zeit hat man auch Versuche mit elektrischen Schnellfernbahnen gemacht. So ist mit der S. 365 abgebildeten elektrischen Lokomotive von Siemens u. Halske eine Geschwindigkeit von 160 km in der Stunde erreicht worden, die das Maximum unserer gewöhnlichen Schnellzüge fast um das Doppelte übertrifft. In dieser größeren Geschwindigkeit ist indes der Hauptvorzug solcher für weitere Strecken geplanten elektrischen Bahnen nicht zu suchen, sondern vielmehr in der größeren Sicherheit des Betriebes und der unter Umständen wesentlich



Funkenbündel aus einem Induktor. Vgl. Text, S. 361.





1. Hochbahnstrecke am Halleschen Ufer mit der Haltestelle Möckernbrücke.



2. Überschreitung der Anhaltischen Eisenbahn und des Landwehrkanals.



3. Anschlußdreieck zwischen Zoologischem Garten und Potsdamer Platz.

Elektrische Stadtbahnen I.

Elektrische Hochbahn in Berlin.



1. Flußstrecke.



2. Landstrecke.

Elektrische Stadtbahnen II.

Schwebebahn Barmen-Elberfeld-Vohwinkel.

ökonomischeren Arbeit derselben. Auch kann man hinter einem elektrisch betriebenen Zug den Strom sofort automatisch ausschalten und dadurch Zusammenstöße unmöglich machen. Bei elektrischen Bergbahnen nutzt man die dort stets vorhandenen Wasserkräfte aus. Die mit Dampf getriebene Brennerbahn verbraucht z. B. fast für eine Million Mark an Kohlen im Jahre, während überall auf ihrem Wege die Natur ihre unerschöpflichen Wasserkräfte zur Verfügung stellt. Während man heute auch bei der Talfahrt viel Kohlen verbraucht, um den nötigen Gegendampf zu geben, könnte man den elektrischen Betrieb so einrichten, daß die Bewegung des Zuges infolge der Schwerkraft sogar wieder elektrische Kraft erzeugt, die man aufspeichert.

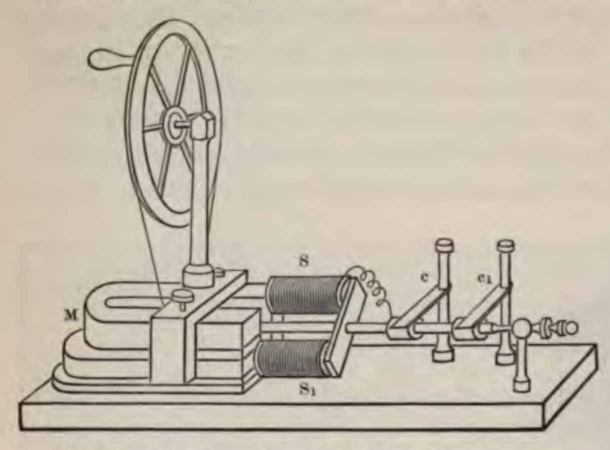


Schnellbahnlokomotive von Siemens und Halske. Vgl. Text, S. 364.

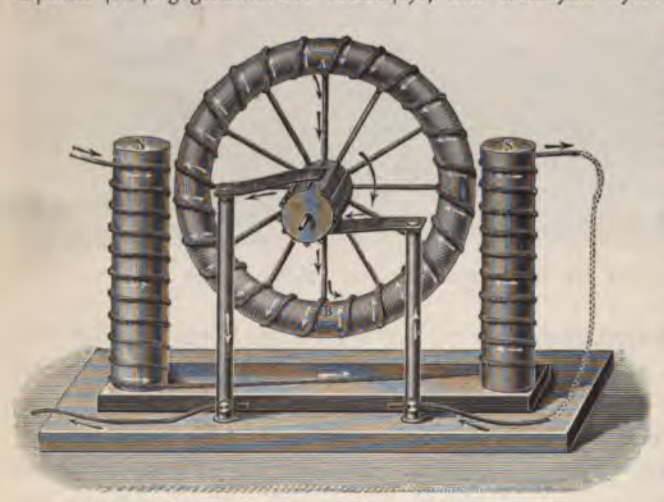
Wir müssen uns nun noch einen Augenblick mit dem Prinzip der Konstruktion der Dynamomaschinen beschäftigen, mit denen die moderne Elektrotechnik in so hervorragender Weise arbeitet.

Denken wir uns einen permanenten Magnet in Hufeisenform M, vor dessen Polen zwei Induktionsspiralen $S S_1$ rotieren, so haben wir bereits eine Wechselstrommaschine vor uns, wenn wir durch Schleifkontakte $c c_1$, wie dies die Zeichnung S. 366 oben andeutet, den Spulen den durch ihre Bewegung vor den Magnetpolen entstehenden Strom abnehmen. Daß die Maschine wirklich einen Wechselstrom, d. h. einen bei jeder ihrer Umdrehungen einmal seine Richtung ändernden Strom erzeugt, beweist eine leichte Betrachtung. Wir haben den Induktionsstrom als eine Gegenwirkung erkannt; beinahe könnten wir ihn mit einer Brandung gegen

eine Strandlinie vergleichen, wo große Druckkräfte wirken, die das Wasser seiner ursprünglichen Richtung entgegentreiben. Wo die Hindernisse am größten sind, da ist auch die Brandung am mächtigsten. Für die Erzeugung des Induktionsstromes sind nun die magnetischen Kraftlinien die Hindernisse. Wo diese sich am dichtesten zusammendrängen und die Induktionsspule deren am meisten bei ihrer Rotation durcheilen muß, entsteht die kräftigste „Induktionsbrandung". Bei unserer Maschine tritt sie ein, wenn die Spulen quer zu dem Pole liegen, denn alsdann stehen die aus den Polflächen gewissermaßen fontänenartig hervorsprudelnden Kraftlinien senkrecht zu den Windungen der Spulen, die ihnen den größten Widerstand bieten. Der Strom möge in dieser Stellung von der rechten zur linken Seite fließen. Nach einer Viertelumdrehung ist die Lage der von einem Pol zum anderen sich hinüber spannenden Kraftlinien parallel zu den Spulenwindungen, die ihnen nun kein Hindernis mehr bieten, und der Strom sinkt auf Null herab. Nach abermals einer Viertelumdrehung hat er wieder ein Maximum erreicht. Da nun der den Induktionsstrom erzeugende magnetische Strom natürlich dieselbe Richtung stets beibehält, so muß auch der Induktionsstrom wieder von der jetzt rechts stehenden Spule zu der linken fließen, nur sind nun die beiden Spulen selbst gegeneinander vertauscht, und innerhalb ihres Kreises ist der Strom ein umgekehrter geworden. Nach einer weiteren Viertelumdrehung ist auch dieser Strom wieder auf Null herabgesunken und so fort. Durch diese einfache Vorrichtung werden also ohne Batterie, ohne Ruhmkorffsche Spiralen und ohne Unterbrecher nur durch mechanische Wirkung Wechselströme erzeugt, deren Größe allerdings durch die Kraft des verwendeten permanenten Magnets begrenzt ist.

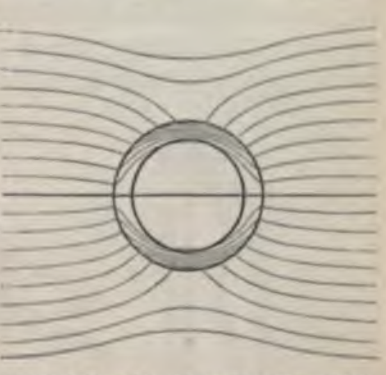


Prinzip der Wechselstrommaschine. Vgl. Text, S. 365.

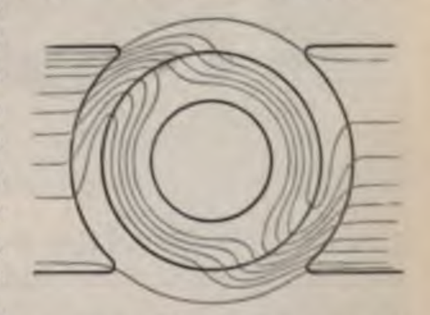

Prinzip der Gleichstrommaschine. Vgl. Text, S. 367.

Es lag nun der Gedanke nahe, den erzeugten Strom selbst wieder zu verwenden, um einen Elektromagnet zu erregen, der an die Stelle jenes permanenten Magnets zu treten hätte. Da wir die Kraft der Elektromagnete fast beliebig steigern können, so gewinnen wir voraussichtlich auch aus einer derartigen Maschine wesentlich stärkere Ströme. Wir sehen aber

leicht, daß eine Wechselstrommaschine zu einer solchen Anordnung untauglich ist, da mit ihrem Stromwechsel auch die Magnetpole wechseln würden, und die beiden Kraftliniensysteme, die gegeneinander „branden“ sollen, sich beständig in gleicher Richtung verschieben, also gewissermaßen einander ausweichen. Durch die folgende, von Pacinotti und Gramme erfundene Anordnung, deren Prinzip für den Bau der modernen Dynamomaschinen im wesentlichen maßgebend geblieben ist, erreichen wir dagegen unseren Zweck.


Eisenhohlkugel im homogenen Magnetfeld.

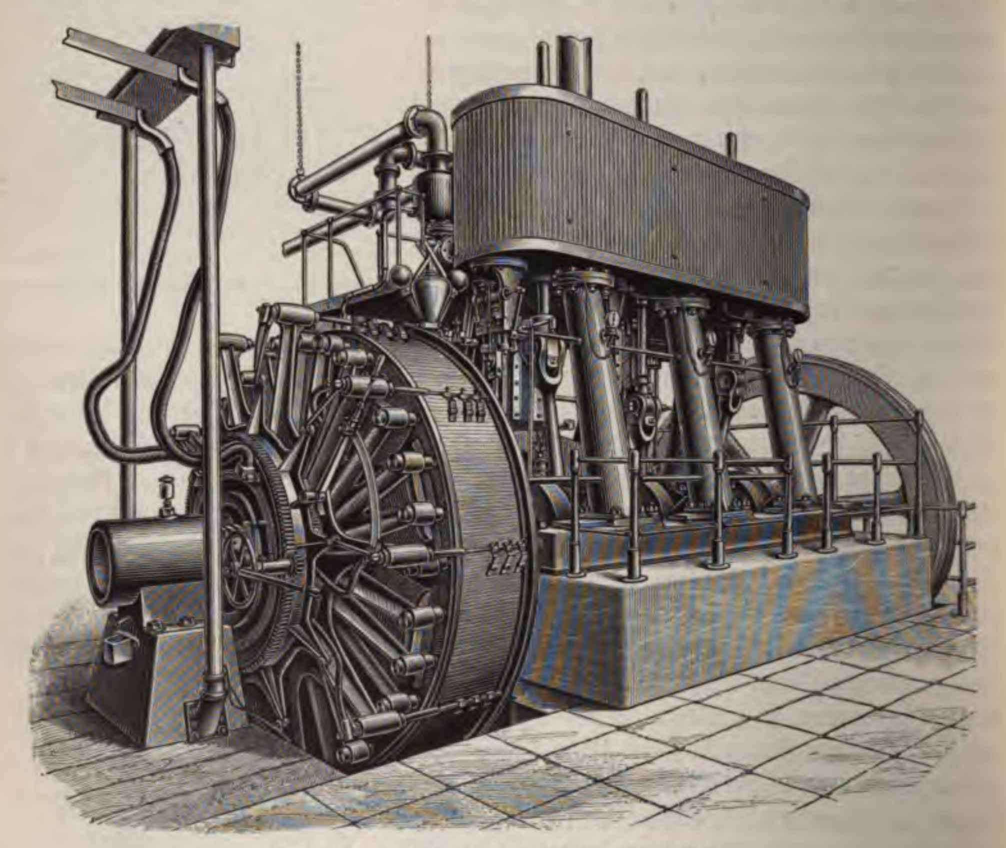
Die Gleichstrommaschine ist S. 366 unten in ihrer einfachsten und übersichtlichsten Form abgebildet. Sie besteht in der Hauptsache aus dem Elektromagnet, zwischen dessen Polen NS, die wie zwei Stabmagnete aussehen, aber unten durch eine Eisenplatte verbunden sind, der sogenannte Pacinottische Ring AB liegt. Dieser Ring, gleichfalls aus Eisen und, wie aus der Zeichnung ersichtlich, um seine Achse drehbar, hat den Zweck, die magnetischen Kraftlinien, die ohne ihn geradewegs, in unserem Fall in wagerechten Linien von einem zum anderen Pol des Magnets verlaufen würden, in den Eisenring hineinzuziehen, sie also hier zu besonders kräftiger Wirkung zu verdichten. Die hier beigefügten schematischen Zeichnungen veranschaulichen es, wie ein Ring oder eine Hohlkugel die Kraftlinien in sich hineinziehen oder zusammendrängen. Der Ring der Gleichstrommaschine ist mit Kupferdrähten umwickelt, und jede zweite Windung ist leitend mit einer aus isolierendem Material bestehenden Trommel verbunden, die die Drehungsachse des Ringes umgibt. Hier endigen die Verbindungsstücke in Drähten, die längs der Trommelwand parallel mit der Drehungsachse liegen. Nur die jeweilig oberste und unterste von jenen Drahtendigungen steht durch Schleifkontakte, die sogenannten Bürsten mn, in leitender Verbindung mit dem weiteren Stromkreise. Dieser wird, wie aus der Zeichnung ersichtlich ist, um die Magnetpole geführt, um diese zu erregen. Setzen wir zunächst diese Erregung als vorhanden voraus, so entstehen bei der Drehung des Ringes Induktionsströme in seiner Umwickelung, wie sie durch Pfeile angedeutet sind. In den Punkten A und B sind diese Ströme am kräftigsten, weil der Ring hier die meisten der auf den Windungen senkrecht stehenden Kraftlinien in sich vereinigt. Hier sind zugleich durch die Bürsten die Abnahmestellen für den Strom eingerichtet, der durch diese Verbindung, wie wohl unmittelbar aus der Zeichnung ersichtlich ist, immer in derselben Richtung fließen muß. Da nun im Eisen stets etwas remanenter Magnetismus enthalten ist, so beginnt die Maschine bei der Drehung ihre Tätigkeit von selbst und verstärkt dann, rasch anschwellend, ihre Wirkung, deren Maximum von der Drehungsgeschwindigkeit abhängt, also mit mechanischen Mitteln theoretisch nach Belieben gesteigert werden kann.


Verlauf der Potentiallinien im Pacinottischen Ring.

Welche Riesendimensionen inzwischen der Bau der Dynamomaschinen angenommen, und wie sich ihre Form seither wesentlich verändert hat, ist bekannt. Wir können auf die verschiedenen

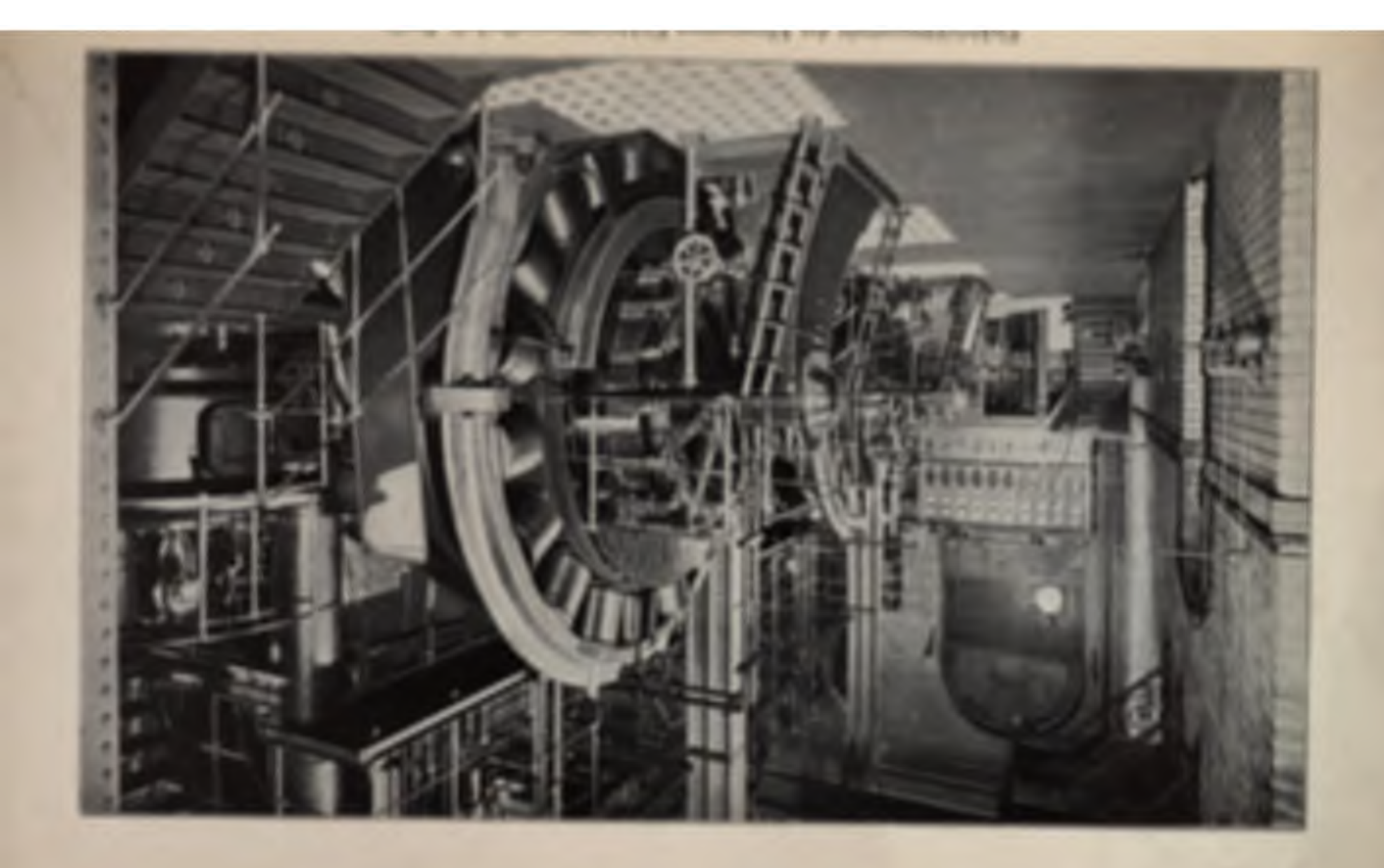
Konstruktionen hier nicht eingehen und noch weniger auf alle die sinnreichen Nebeneinrichtungen, welche der elektrische Großbetrieb heute notwendig macht, sondern begnügen uns damit, zwei moderne Dynamomaschinen hier und auf S. 369 abzubilden und einen Einblick in eine große Elektrizitätszentrale bildlich zu gewähren (s. die beigeheftete Tafel „Elektrizitätszentrale der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft Berlin").

Unsere Betrachtungen auf S. 361 zeigten, daß die Spannung der Induktionsströme mit der Geschwindigkeit der Unterbrechungen des primären Stromes wächst. Auf rein mechanischem



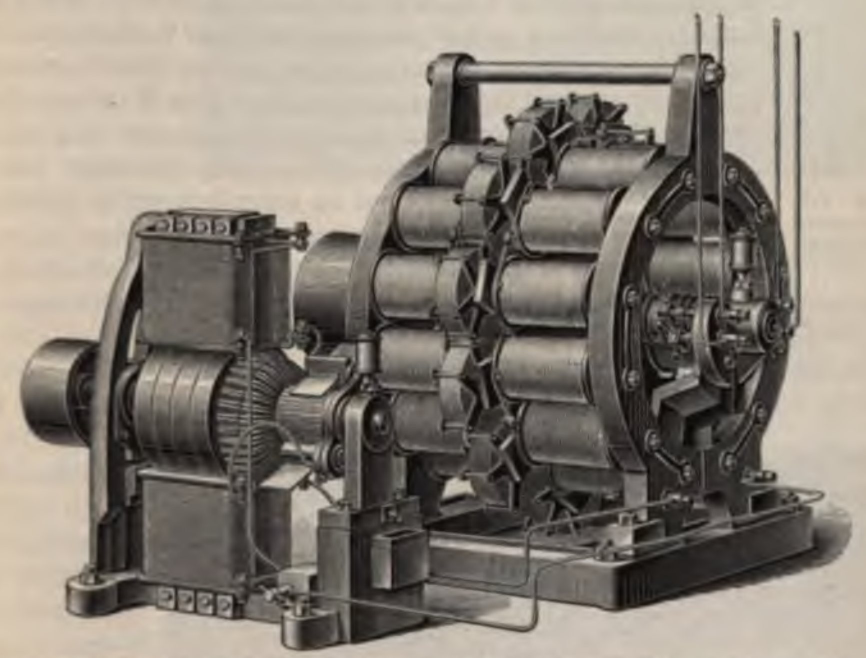
Gleichstrommaschine von Siemens und Halske.

Wege ließ sich die Frequenz dieser Unterbrechungen nicht mehr wesentlich steigern. Nun kam aber Tesla auf den glücklichen Gedanken, die wahrgenommenen Oszillationen des Entladungsfunkens (S. 325) als Stromunterbrecher anzuwenden, wodurch ihm eine Reihe höchst interessanter Versuche mit Strömen von bisher nie erreichter Spannung gelangen, deren Anwendung Aussichten von völlig märchenhafter Tragweite gestatten. Auf S. 370 oben ist der Versuch für die Erzeugung der sogenannten Teslaströme schematisch veranschaulicht. Von einem Funkeninduktor A werden die Induktionsströme zu den inneren Belägen zweier isoliert aufgestellten Leidener Flaschen C C von möglichst großen Dimensionen geleitet. Zwischen dieser Leitung ist eine „Funkenstrecke" J eingeschaltet, durch welche sich die Leidener Flaschen gegenseitig entladen können. Dies geschieht oszillierend in Zwischenzeiten von wenigen Hunderttausendsteln,





ja Millionsteln einer Sekunde. Die Ausgleichungen finden nicht zwischen dem äußeren und inneren Belag der Flaschen, sondern nur zwischen den beiden inneren Belägen statt. In gleichen Intervallen mit diesen Oszillationen schwanken auch die Spannungen der beiden äußeren Beläge, die durch einen Öltransformator miteinander in Verbindung stehen, und zwar bildet dieser die primäre Spule P des Transformators. Die Stromunterbrechungen finden hier in Zwischenzeiten statt, die sich nach Millionsteln Sekunden bemessen, und durch sie werden nun in der sekundären Spule S jene Teslaströme von außerordentlicher Spannung hervorgerufen, die in der Funkenstrecke DD sich entladen können. Es ist also hier gewissermaßen ein zweiter Induktor an einen ersten geschaltet, der seine Wirkungen potenziert.



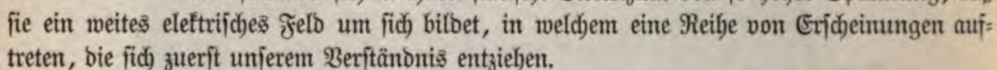
Siemens' Wechselstrommaschine, mit der Erregermaschine verbunden. Vgl. Text, S. 368.

Zunächst zeigt es sich, daß diese Teslaströme trotz ihrer ungeheuern Spannung dem Menschen nicht gefährlich werden, während dies die gewöhnlichen Induktionsströme bei entsprechender Stärke in hohem Maße sind. Der menschliche Körper kann einen gleichmäßig fließenden Strom von sehr großer Stärke nicht nur ertragen, er empfindet ihn nicht einmal. Nur Stromschwankungen werden ihm gefährlich, welche Induktionsströme im Körper erregen. Diese rufen in den Muskeln Zuckungen hervor, wie sie Galvani selbst nur beim Öffnen und Schließen des kleinen galvanischen Stromes, den er unbewußt erzeugt hatte, an den Froschschenkeln beobachtete. Es ist deshalb ohne weiteres nicht gefährlich, den aus einer Dynamomaschine kommenden noch so starken Gleichstrom durch den Körper gehen zu lassen; dagegen kann ein tödlicher Schlag in dem Augenblick erfolgen, in welchem etwa die Maschine angehalten wird. Ebenso ist es die erste Berührung, welche gefährlich ist. Läßt man dagegen zuerst einen schwachen Strom durch den Körper fließen, so kann man ihn allmählich bis zu großer Höhe steigern. Nicht das Gleiche ist der Fall bei Induktionsströmen aus Funkeninduktoren, die schon

bei sehr geringer Stärke recht empfindlich werden, weil sie ihre Richtung beständig ändern. Daß die Teslaströme ungefährlich sind, beweist, daß unsere Muskeln auf eine bestimmte Frequenz als Grenzwert abgestimmt sein müssen, ebenso wie das Ohr und das Auge nur Wellenzüge empfinden, die innerhalb ganz bestimmter Schwingungszahlen liegen. Die Teslaströme wechseln so schnell, daß sie von den Muskeln als einheitliche Wirkung, als Gleichstrom empfunden werden.

Prinzip des Teslastromes. Vgl. Text, S. 368.

Schon mit einem gewöhnlichen Funkeninduktor kann man alle Erscheinungen der statischen Elektrizität wiederholen, die wir mit Hilfe einer Elektrisiermaschine angestellt hatten, denn wir verfügen hier wieder über die hohen Spannungen, welche die Elektrizität auch einseitig in merklicher Menge in Reservoire, Konduktoren, zu treiben vermag. Der Name Funkeninduktor besagt dies ja schon; wir können zwischen den beiden Enden der Induktionsrolle Funken von bedeutender Länge überspringen lassen. Dies ist in noch erhöhtem Maße mit den Teslaströmen der Fall. Das untenstehende Bild zeigt, wie der Erfinder unter gewaltigen Blitzen ruhig und sicher sitzen bleibt. Auch kann man einen Teslastromkreis offen und die beiden Leitungen in Metallplatten endigen lassen, wie es die schematische Zeichnung, S. 371 oben, angibt; alsdann sammelt sich in ihnen statische Elektrizität von so hoher Spannung, daß



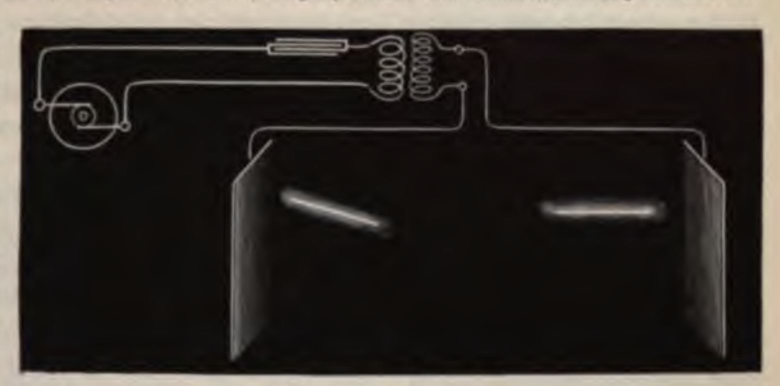
sie ein weites elektrisches Feld um sich bildet, in welchem eine Reihe von Erscheinungen auftreten, die sich zuerst unserem Verständnis entziehen.

In dieser elektrischen Atmosphäre, die sich sonst durch nichts verrät, leuchten sogenannte Geißlersche Röhren auf, in denen sehr verdünnte Gase eingeschlossen sind (s. die obere Abbildung, S. 371). Die elektrischen Schwingungen des Äthers zwischen diesen Platten, welche durch die sehr hohen Spannungen erzeugt werden, reißen die freien Moleküle des Gases in ihre Bewegung mit hinein und versetzen sie in Lichtschwingungen. Die Glasröhre ist dabei in keinerlei leitender Verbindung mit dem Stromkreise und kann in beträchtlicher, nach Metern bemessener Entfernung von jenen geladenen Platten entfernt sein. Auch wenn man eine der Platten mit der Hand berührt und in die andere Hand eine Geißlersche Röhre nimmt, oder den Strom selbst durch eine ganze Reihe von Personen führt, tritt die Erscheinung sofort



Teslastromentladungen.

bei der nur einseitigen Berührung der Röhre hervor. Sind die Lichtentwickelungen in solchen verdünnten Gasen immer nur sehr schwache (man nennt sie Glimmlichtentladungen), so hat dagegen die sogenannte **Teslalampe** ein wesentlich helleres Licht, das von dem Erfinder selbst so genannte „**Licht der Zukunft**". In dieser Lampe erglüht unter dem Einflusse der „**Induktionsströme mit starker Frequenz**" ein Mineralstoff, ohne daß die Lampe in irgend einer leitenden Verbindung mit einer Elektrizitätsquelle wäre. Wir haben eine elektrische Glühlampe ohne Draht vor uns, die man auch frei im Wasser schwimmen lassen kann.


Teslalicht. Vgl. Text, S. 370.

Tesla, der, wie wir schon zu Anfang unserer Betrachtungen über die elektrischen Erscheinungen erwähnten, eine glühende Phantasie mit großem Können vereinigt, hat an diese Erfindung seines Zukunftslichtes eine ganz gewaltige Perspektive geknüpft. Die höheren Schichten unserer Atmosphäre verhalten sich gegen die an der Erdoberfläche wie die verdünnte Luft in jenen Geißlerschen Röhren gegen die sie umgebende Luft. In jenen höheren Regionen spielen sich die Erscheinungen der **Polarlichter** ab, die in ihrem Wesen jedenfalls viel Ähnlichkeit mit jenen Glimmerscheinungen in den Geißlerröhren haben. Gelingt es, das Feld eines Teslastromes bis in diese Regionen auszudehnen (und das ist heute nur noch eine Geldfrage), so erleuchten wir damit unsere Atmosphäre aus eigener Kraft und verbreiten ein gleichmäßiges Licht über ganze Ländergebiete, das an Stelle der verstreuten Nachtbeleuchtung treten würde. Ja, die von den physikalischen Erfahrungen befruchtete Phantasie erlaubt es, von einer fernsten Zukunft zu träumen, in der die gewaltigen Fortschritte der Technik, die schon so viele Wunder vollbracht hat, uns befähigen, das Licht der erlöschenden Sonne auf diesem Wege zu ersetzen, so daß der Mensch, in immer weiterer Beherrschung der ihm zur Seite gestellten Naturgewalten, sich von der strahlenden Allerhalterin mehr und mehr unabhängig macht. Heute strömen noch alle Kräfte, die wir in der Technik verwenden, auf den verschiedensten Umwegen von der Sonne aus. Nur gerade die Kraftquelle, welche die Berührungselektrizität aus den Körpern zufolge ihrer chemischen Verwandtschaften hervorlockt, quillt ausschließlich aus den Eigenschaften der Stoffe, die unserer Erde angehören. In der Berührungselektrizität haben wir also die letzte Kraftquelle, die für irdische Wesen noch in fernster Zukunft fließen kann.



Kohärer. Vgl. Text, S. 372.

Da man vorher niemals für Ströme von hoher Frequenz eine derartige Größe des elektrischen Feldes erreicht hatte, kam man auf den gewiß zuerst völlig abenteuerlich erscheinenden Gedanken, mit Hilfe dieses Feldes Zeichen nach entfernten Stationen zu geben, eine **Telegraphie ohne Draht** zu erfinden. **Marconi** war es, der die ersten praktischen Resultate in dieser Richtung erzielte. Man wußte, daß die Leitungsfähigkeit einer kleinen, mit

Eisenstaub P (s. die untere Abbildung, S. 371) gefüllten Röhre GG sich unter dem Einfluß eines solchen von Ätherschwingungen durchzogenen elektrischen Feldes so weit veränderte, daß man dadurch ein mit ihr durch die Leitung $E_1 E_2$ verbundenes Relais bewegen und mit diesem wieder einen Morse-Apparat von gewöhnlicher Konstruktion in Tätigkeit setzen konnte. Die Eisenteilchen ordnen sich dabei offenbar längs der Kraftlinien des elektrischen Feldes und bilden dadurch einen zusammenhängenden Magnet. Deshalb hört nun auch die Wirkung der Röhre nach dem ersten Impulse auf, wenn man nicht durch fortwährende kleine Erschütterungen derselben dafür sorgt, daß diese magnetischen Gruppierungen immer nur einen Augenblick lang vorhanden sind, um die gewünschte Wirkung auszuüben. Eine mit entsprechenden Vorrichtungen versehene derartige Röhre heißt ein **Kohärer** oder Fritter. Mit Hilfe dieses kleinen Instruments sind wir in der Lage, uns durch viel geringere Ströme, als sie für die Teslaversuche nötig sind, aber immer hohe Spannungen vorausgesetzt, über viele Kilometer hinweg ohne andere Verbindung als die freie Luft telegraphisch zu verständigen. Eine dazwischenliegende Stadt mit ihren Häusergruppen, Telegraphen- und Telephondrähten stört die Verbindung nicht. Erscheint es nicht wie ein wahrhaftes Wunder, wenn man sieht, wie zwei Morse-Anker, von denen der eine in Chamonix am Fuße des Montblanc, der andere auf seinem Gipfel, 12 km in der Luftlinie entfernt und 3350 m höher liegt, wobei beide unter Dach und Fach aufgestellt und ohne alle sichtbare Verbindung miteinander stehen, in demselben Augenblicke ganz gleiche Bewegungen ausführen, als wären sie nebeneinander durch ein festes Räderwerk verbunden. Bei diesen im August 1899 von **Jean** und **Louis Lecarme** ausgeführten Versuchen verhüllten zeitweilig Wolken den Gipfel. Später wurden auch im Vereine mit dem Erbauer des Observatoriums auf dem Montblanc, **Vallot**, Versuche im freien Ballon angestellt und aus einer Höhe von 800 m in 5—6 km horizontaler Entfernung noch eine gute Verständigung erzielt. Auch durch den dichten Nebel des Kanals hindurch hat der Marconische Telegraph bereits zur Rettung Schiffbrüchiger beigetragen, indem man sich zwischen dem Leuchtturme von South-Fareland und einem 20 km entfernten Leuchtschiffe verständigte.



Prinzip der drahtlosen Telegraphie.

In der obenstehenden Zeichnung ist die Anordnung einer Station für drahtlose Telegraphie dargestellt. Auf der Aufgabestation I wird durch den Taster T die Batterie A und damit der Funkeninduktor J in Wirksamkeit gesetzt; zwischen den mit 1, 3, 4, 2 bezeichneten Kugeln springen dann Funken über. 3 und 4 sind in Öl getaucht, wodurch die Spannung ihres Entladungsstromes wesentlich erhöht wird, so daß die weit ausstrahlenden Wellen gebildet werden können. Diese treffen auf der Empfangsstation II den Kohärer C, dessen Eisenstäubchen sich dadurch derart lagern, daß der Strom der Batterie B geschlossen wird. Er wirkt auf ein Relais R, das den starken Lokalstrom von der Batterie D einschaltet und das Läutewerk k ertönen läßt. Dieses ist so eingerichtet, daß es den Kohärer beständig erschüttert, um ihn wirksam zu erhalten. In den Lokalstrom ist zugleich ein gewöhnlicher Morse-Schreiber Schr. eingeschaltet, der nun ebenso wie bei der gewöhnlichen Telegraphie kurze oder lange Zeichen notiert, je nachdem man auf der Abgangsstation den Taster kürzere oder längere Zeit niederdrückt. Die zweite Abbildung, S. 373, gibt die instrumentelle Ausrüstung einer Station für drahtlose (Funken-) Telegraphie

an Bord eines Ozeandampfers und die nächste Abbildung, S. 374, das Häuschen auf Helgoland, von welchem solche elektrischen Wellen weit in das Meer hinausgesandt oder empfangen werden. Wir sehen den 40 m hohen Mast, an dem das Drahtnetz (die sogenannten Antennen) befestigt ist, das so ungemein feinfühlig ist, daß es die Wellen empfängt und dem Kohärer zuführt. Endlich geben wir auch eine Originaldepesche wieder (s. die Abbildung, S. 375), welche am 19. Oktober 1901 auf dieser Station empfangen wurde.

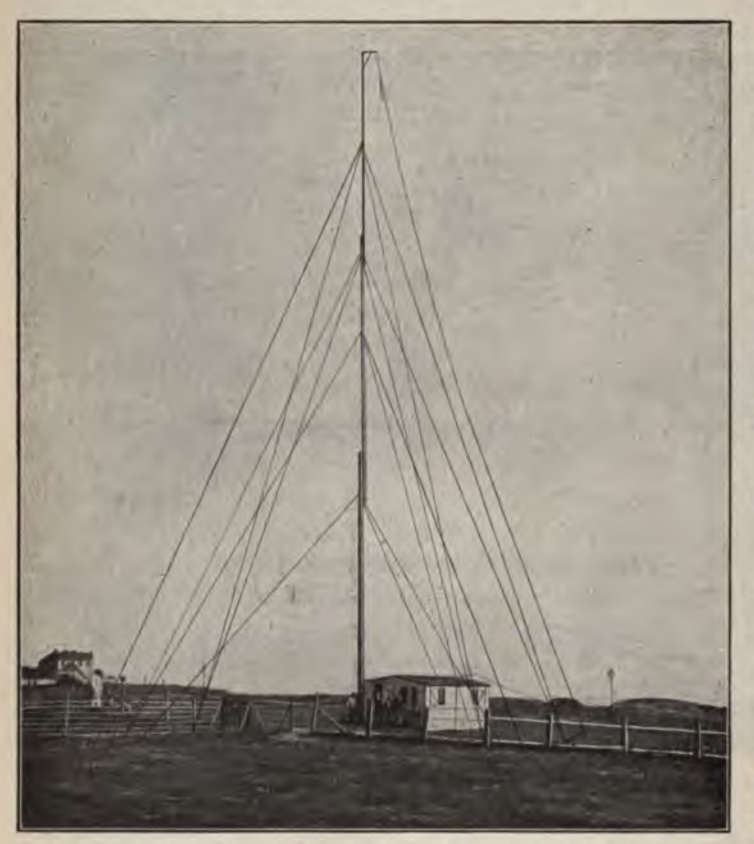
Auf den bereits regelmäßig tätigen, in Deutschland offiziell „Funkensprungstationen" genannten Wellentelegraphiestationen hat man sichere Verständigungen bis zu 200 km erreicht.



Station für Funkentelegraphie an Bord eines Ozeandampfers des Norddeutschen Lloyd.
Vgl. Text, S. 372.

Es sind dabei zwei verschiedene Systeme hauptsächlich miteinander in Konkurrenz getreten, das System Slaby (Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft) und Braun (Siemens u. Halske). Das wichtigste für die praktische Anwendung ist die Sicherheit, daß die allseitig vom Sendeapparat in den Raum hinausgehenden Wellen doch nur immer von dem betreffenden Empfangsapparat verständlich aufgefangen werden können und nicht von jeder beliebigen, in dem elektrischen Felde befindlichen Empfangsstation. Dies wird durch Abstimmung der Apparate auf bestimmte Wellenlängen erzielt. Ebenso wie unter einer beliebigen Anzahl von verschiedenen Stimmgabeln doch nur immer diejenige auf einen bestimmten Ton mitschwingt, deren Schwingungszahl gleich der jenes Tones ist oder mit ihm in einem einfachen Verhältnis steht, so kann man den benutzten elektrischen Wellen einerseits eine bestimmte Länge geben, indem man die Entladungen der Leidener Flaschen durch Drähte von entsprechender Länge hin und her schickt, die keinen geschlossenen Kreis bilden, und anderseits den Empfangsapparat mit ebenso langen

Aufnahmedrähten versehen. Ihre „Resonanzwirkung" verstärkt dann die ankommenden Wellen von gleicher oder entsprechend abgestimmter Länge, so daß die Empfangsapparate von ihnen in Tätigkeit gesetzt werden. Gewöhnlich wendet man heute für praktische Zwecke Wellen von etwa 100 m Länge an und benutzt die Resonanz der Viertelwellenlänge, so daß also etwa 25 m lange Drähte, die natürlich in beliebiger Weise aufgerollt sein können, in der vorhin beschriebenen Weise zur Verwendung kommen. In einem Vortrag auf der Karlsbader Naturforscherversammlung von 1902 zeigte Voller (Hamburg) experimentell, daß eine Änderung dieser Drahtlänge von weniger als 1 m ausreicht, das Spiel der Apparate zu verhindern.



Die Station für Funkentelegraphie auf Helgoland. Vgl. Text, S. 373.

Die Systeme Slaby und Braun unterscheiden sich im wesentlichen dadurch, daß Slaby durch eine Erdleitung den „Nullpunkt" des Wellenausganges und damit die Wellenlänge zu sichern sucht, während Braun in dem Sendedraht überhaupt keine Funkenstrecke einschaltet und ihn nicht zur Erde ableitet.

Das System, mit welchem Marconi in neuerer Zeit große Erfolge erzielt zu haben glaubt, ist nicht öffentlich bekannt geworden. Nach seinen Mitteilungen ist es ihm Ende 1901 gelungen, selbst zwischen Amerika und Europa Zeichen auszutauschen. Da die Strahlen auf ihrem geraden Wege zwischen diesen beiden Kontinenten der leitenden und deshalb schirmbildenden Erdkugel begegnen, müßten hier noch besondere Einflüsse hinzutreten, eine solche Verbindung zu ermöglichen. Es scheint indes, daß sich in der Tat die elektrischen Wellen leitenden Flächen anzuschmiegen trachten und in solchen Fällen wirklich einen krummen Weg nehmen können.

Für diese überseeischen Versuche ist es in jüngster Zeit (1900) Tesla gelungen, starke Ströme mit noch weit höherer Spannung als bisher, bis zu 50 Millionen Volt, zu erzeugen; ja, er meint, daß er elektrische Wellen bis in den freien Weltraum hinaussenden könne, die auf einen entsprechend feinen Apparat noch auf dem Mars wirken. Daß tatsächlich elektrische Wellen zwischen den Weltkörpern zirkulieren, ist unzweifelhaft; die instrumentellen Vorrichtungen

zu einer solchen „interplanetaren Telegraphie“ sind gleichfalls vorhanden; es läßt sich deshalb nicht mehr leugnen, daß die Ausführung dieser gigantischen Idee, mit etwaigen Intelligenzen außerhalb unseres Erdkreises in Gedankenaustausch zu treten, vorausgesetzt, daß sie unsere Anregungen verstehen, nur eine Frage der nötigen Kraftanhäufung, für uns also heute nur noch eine Geldfrage ist.

g) Elektrooptik.

Wir haben im vorangehenden schon häufig von dem engen Zusammenhange zwischen Licht und Elektrizität zu sprechen gehabt, ja, wir sind bereits zu der Überzeugung gelangt, daß diese beiden Erscheinungen nur quantitativ verschiedene Bewegungsformen des Äthers sind,

Prof. Braun's und Siemens & Halske's drahtlose Telegraphie.



Aufgenommen um 11 Uhr 30 M. V. durch Stat.: Helgoland.	Telegramm, eingetroffen von Leuchtschiff Elbe 1 am 19. Oktober 1901.	Per Kabel weiterbefördert um 11 Uhr 40 Min. V.

Text: Anruf (..) von SS (Stationszeichen von Elbe I). DD (Dampfer) Marseille wünscht nach Hamburg gemeldet zu werden an Sloman. Schlußzeichen

Eine mittels Funkentelegraphie empfangene Depesche. Vgl. Text, S. 373.

die auch das Licht von der strahlenden Wärme unterscheiden. Faraday hatte durch seine Untersuchungen über die dielektrischen Erscheinungen und die Drehung der Polarisationsebene in einem magnetischen Felde (S. 302) den ersten Anstoß zu einer Elektrooptik gegeben. Maxwell hatte dann durch scharfsinnige theoretische Untersuchungen gezeigt, daß eine Störung in einem dielektrischen Medium, als welches wir uns den Äther vorstellen, elektromagnetische Wellen hervorbringen muß, die den Lichtwellen in der Form wie auch der Geschwindigkeit gleich sind, aber mit dem Unterschiede, daß die elektrischen Schwingungen auf den magnetischen senkrecht stehen. Ist diese Übereinstimmung nun wirklich vorhanden, so müssen auch alle die übrigen Eigenschaften des Lichtes sich experimentell bei der Elektrizität wieder finden lassen, ebenso wie wir alle Eigenschaften einer Wellenbewegung, mit Ausnahme der Größenverhältnisse, beim Schall und beim Lichte gemeinsam fanden. Diese Gemeinschaft erstreckte sich z. B. auf die Bildung stehender Wellen, die Polarisation, die Reflexion. Es ist das Verdienst des genialen, leider so jung verstorbenen Hertz (sein Bildnis s. S. 376), eines Schülers von Helmholtz, alle diese Eigenschaften an den elektrischen Wellen gleichfalls sichtbar nachgewiesen zu haben.

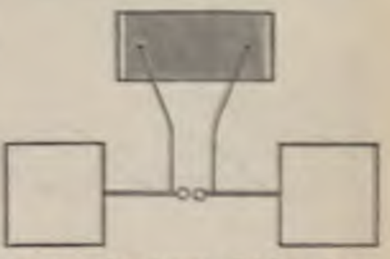
Eine experimentelle Schwierigkeit bot hier die voraussichtlich sehr große Länge der zu untersuchenden elektrischen Wellen. Wenn diese durch die dem Äther irgendwie erteilten Impulse entstehen, so mußten, wie bei allen anderen Fortpflanzungen von Wellen, so viele auf den von ihnen in einer Sekunde durcheilten Raum gehen, als in derselben Zeit Impulse erfolgen. Der durcheilte Raum ist in unserem Falle 300,000 km. Bei 1000 Impulsen in der Sekunde muß also die Wellenlänge immer noch 300 km betragen. Die kürzesten oszillierenden Entladungen der Leidener Flaschen hatte man etwa gleich einer Millionstel Sekunde gefunden. Damit erhalten wir immer noch eine Wellenlänge von 300 m, die viel zu groß ist, um mit ihr die gewünschten praktischen Versuche anstellen zu können. Es kam also zunächst darauf an, die Oszillationsdauer von Entladungen noch wesentlich kürzer zu machen, was Hertz gelang, indem er, theoretischen Betrachtungen folgend, den angewendeten Konduktoren besondere Formen gab. Er konnte so die Oszillationsdauer auf einige Tausendmillionstel Sekunden herabdrücken und damit elektrische Wellen bis zu 6 cm Länge erzeugen. Wieviel größer diese Wellenlängen immer noch sind als die des Lichtes, besagt schon der Umstand, daß wir diese nach Millionsteln von Millimetern zu bemessen pflegen.



Heinrich Rudolf Hertz. Vgl. Text, S. 375.

Stellen wir einem solchen Hertzschen Oszillator, der auf S. 377 oben schematisch abgebildet ist, in einigen Metern Entfernung eine Metallwand gegenüber, so werden die elektrischen Wellen von dieser reflektiert, als wenn es Lichtwellen wären. Die zurückkommenden Wellen bilden mit den hinlaufenden stehende Schwingungen, deren Abstände von der Wand bei bekannter Schwingungsdauer vorher ganz genau zu berechnen sind. Um auch ihre Beobachtung zu ermöglichen, erfand Hertz den sogenannten elektrischen Resonator (s. die untere Abbildung, S. 377), einen aus Kupferdraht hergestellten, isolierten Kreis, der an einer Stelle durch eine kleine Funkenstrecke unterbrochen ist, und dessen Durchmesser in einem bestimmten Verhältnis zu der zu beobachtenden Wellenlänge steht. Dieser Resonator von Hertz erfüllt im Prinzip denselben Zweck wie der von Helmholtz, mit welchem dieser seine feinen Untersuchungen über die Obertöne ausführte. Er wirkt wie eine Saite, die durch die Schallwellen einer tönenden Saite von gleicher Länge zum Mitklingen gebracht wird.

Bringt man den Hertzschen Resonator an eine Stelle des stehenden Wellenzuges, wo sich ein Wellenbauch bildet, und hält ihn so, daß die Funkenstrecke sich entweder oben oder unten befindet, so sieht man kleine Funken überspringen. In der auf S. 378 oben dargestellten schematischen Zeichnung ist diese Stellung in der mittleren Welle angedeutet. Diese Funken entstehen dadurch, daß sich die Spannungen des oberen und des unteren Wellenzuges durch den Resonator auszugleichen suchen. Wenn man nun den Resonator längs des Wellenzuges verschiebt, so hören die Funken an bestimmten Stellen auf überzugehen; hier liegt offenbar ein Knotenpunkt, wo die Wirkungen der hin- und zurückgehenden Wellen sich aufheben. Man kann weiter einen zweiten und dritten Knotenpunkt bestimmen, die sich in völliger Übereinstimmung mit der Theorie zeigen, und die Wellenlänge dadurch messen. An den elektrischen Wellen sind auch Oberschwingungen nachgewiesen (Kiebitz), die den Obertönen beim Schall entsprechen.

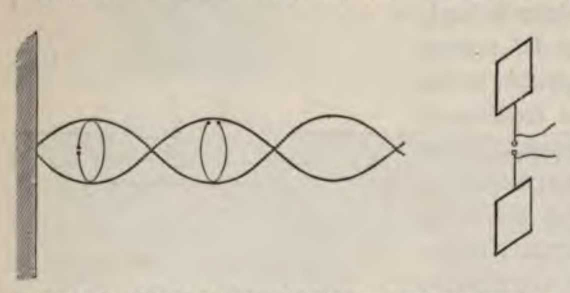

Hertzscher Oszillator. Vgl. Text, S. 378.

Durch den Hertzschen Resonator zeigen wir auch, daß diese Wellen in Wirklichkeit *Schraubenlinien* sind. Drehen wir den Resonator um 90° zu seiner früheren Stellung, wie in der unteren Zeichnung, S. 378, angegeben ist, so finden sich wieder Knotenpunkte, die aber um eine Viertelwellenlänge von den vorhin gefundenen verschoben sind, so daß also da ein Knoten ist, wo in der früheren Lage ein Bauch gefunden wurde. Die Wellenlängen selbst sind aber dieselben. Wir sehen leicht, daß eine Schraubenlinie diese Eigenschaft haben muß, aber es zeigt sich, daß diese zwei Reihen von Wellenzügen, die um eine halbe Wellenlänge differieren, voneinander verschieden sind, so daß wir den einen Wellenzug als einen elektrischen, den anderen als einen magnetischen bezeichnen. Die elektrischen Wellen sind für Metall, allgemein für Leiter undurchlässig und werden von ihnen *zurückgeworfen, wie Lichtwellen von einem Spiegel*. Unsere Abbildung, S. 379, zeigt die Versuchsanordnung, durch welche dies nachzuweisen ist. In R befindet sich der elektrische Strahlen S aussendende Resonator. Die Strahlen werden von dem Metallschirm M genau nach den allgemeinen Reflexionsgesetzen zurückgeworfen und durch den Apparat C als solche nachgewiesen. Wir können diese elektrischen Strahlen nun auch durch Reflexion verdichten, wie wir es mit den Schall-, den Wärme- und den Lichtstrahlen taten. Lassen wir im Brennpunkt eines metallischen Hohlspiegels schnell oszillierende Funken überspringen und stellen dem Spiegel einen gleichen gegenüber, so entstehen in seinem Brennpunkte zwischen zwei isolierten Leitern wieder Funken. Auch *elektrische Linsen* können wir formen, die die gleiche Wirkung auf elektrische Strahlen üben, wie die Glaslinsen auf das Licht. Wir nehmen zu diesem Zwecke, da Glaslinsen in der notwendigen Größe zu kostspielig sein würden, Linsen aus Pech geschmolzen, das als Dielektrikum für die elektrischen Strahlen ebenso durchsichtig ist wie Glas. Dann finden wir hinter der Pechlinse ihren elektrischen Brennpunkt und bestimmen dadurch zugleich das Brechungsverhältnis zwischen Pech und Luft, wie wir es für die Lichtstrahlen taten.


Elektrischer Resonator. Vgl. Text, S. 378.

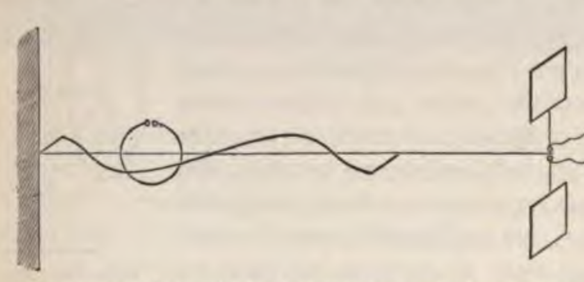
Auf S. 280 haben wir gesehen, daß ein Lichtstrahl von einer ebenen Glasfläche unter einem bestimmten Winkel nur als polarisiertes Licht zurückgeworfen wird, und fanden den Polarisationswinkel abhängig vom Brechungsvermögen des Glases. Die *Polarisation* beobachten wir an den elektrischen Wellen. Lassen wir elektrische Strahlen auf eine Platte aus Schwefel fallen,

so werden sie von derselben so reflektiert, wie es mit einem Lichtstrahl geschehen würde. Der Polarisationswinkel für Schwefel beträgt einige 60 Grad (s. die obere Abbildung, S. 380). Unter diesem Winkel hört die reflektierende Wirkung auf, wenn die Richtung der Oszillationen senkrecht zu der Reflexionsfläche steht; es wird also auch bei den elektrischen Schraubenlinien nur die zur Auffallsebene parallele Komponente zurückgeworfen, die senkrecht in die reflektierende Substanz führende aber gebrochen, wie wir es beim Lichte wahrnahmen, und wie es den allgemeinen mechanischen Prinzipien entspricht, die sich bei allen Schraubenbewegungen wiederholen.



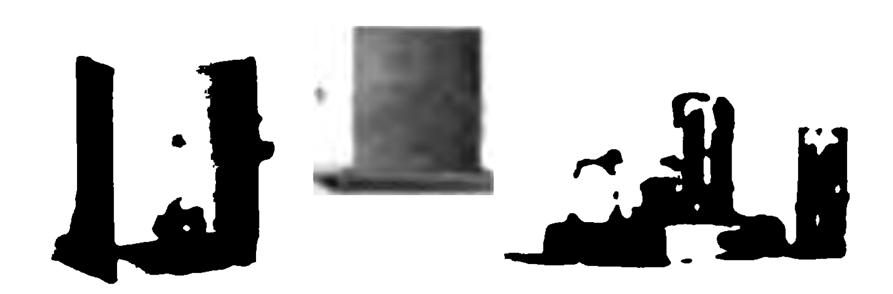
Messung der Länge elektrischer Wellen durch den Hertzschen Resonator. Vgl. Text, S. 377.

In den Weg eines elektrischen Wellenzuges stellen wir ein Drahtgitter. Durch dieses gehen elektrische Strahlen nur hindurch, wenn die Schwingungsrichtung der Entladungsfunken zu der Richtung der Drähte senkrecht steht. Vergleichen wir diese Erscheinung mit denen des Turmalins im polarisierten Lichte, so zeigt sich hier gerade die umgekehrte Wirkung der elektrischen Strahlen. Polarisierte Lichtstrahlen gehen nur durch den Turmalinkristall, wenn ihre Schwingungsrichtung mit der Kristallachse parallel ist, und in dieser Richtung werden auch die materiellen Elemente des Kristalles geordnet sein (S. 280). Bei den elektrischen Strahlen müssen diese Richtungen senkrecht aufeinander stehen. Die Umstände, welche jene Umkehrung verursachen, werden sicher einmal auf rein mechanischem Weg erklärt werden. Eine Andeutung dazu geben interessante Untersuchungen über die Durchlässigkeit verschiedener Wellenlängen durch Gitter. Das Verhältnis der Durchlässigkeit in der einen und der anderen Lage des Gitters zur Schwingungsrichtung ist nur bei den sehr kleinen Wellenlängen des Lichtes für die parallele Lage günstig, vermindert sich aber bereits für die Wärmestrahlen und nähert sich bei Vergrößerung der Wellenlängen den umgekehrten Verhältnissen, die wir bei den elektrischen Strahlen wahrnahmen. Es ist hier auch an die Wirkung von Beugungserscheinungen durch das Gitter zu denken, und man wird vielleicht einmal auf diese Weise ein elektrisches Beugungsspektrum mit hellen Linien, d. h. bestimmten Richtungen, beobachten, auf die die elektrischen Spannungen sich hinter dem Gitter verdichten. Auch kann man die elektrischen Wellen durch eine Vorrichtung, welche im Prinzip völlig dem Nörrenbergschen Interferenzrohre für die Schallschwingungen (S. 145) entspricht, sich gegenseitig aufheben lassen.

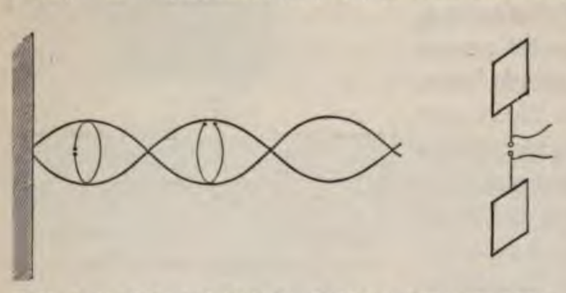


Nachweis der Form elektrischer Wellen durch den Hertzschen Resonator. Vgl. Text, S. 377.

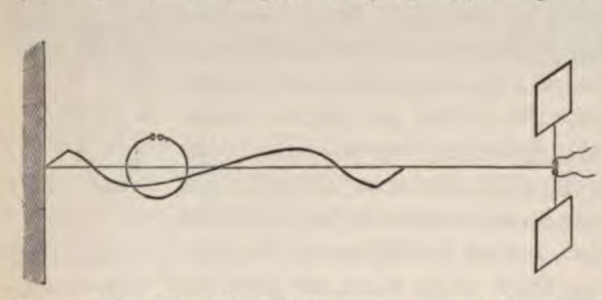
Sehr wichtig sind auch die Untersuchungen von Hertz über die elektrischen Wellen, welche längs der Leitungsdrähte hinziehen. Die Versuchsanordnung hierzu ist aus der unteren Zeichnung, S. 380, ersichtlich. Die oszillierenden Schwingungen wurden durch zwei sich gegenüberstehende Metallplattenpaare auf zwei nebeneinander hergehende Drähte übertragen,



so werden sie von derselben so reflektiert, wie es mit einem Lichtstrahl geschehen würde. Der Polarisationswinkel für Schwefel beträgt einige 60 Grad (s. die obere Abbildung, S. 380). Unter diesem Winkel hört die reflektierende Wirkung auf, wenn die Richtung der Oszillationen senkrecht zu der Reflexionsfläche steht; es wird also auch bei den elektrischen Schraubenlinien nur die zur Auffallsebene parallele Komponente zurückgeworfen, die senkrecht in die reflektierende Substanz führende aber gebrochen, wie wir es beim Lichte wahrnahmen, und wie es den allgemeinen mechanischen Prinzipien entspricht, die sich bei allen Schraubenbewegungen wiederholen.

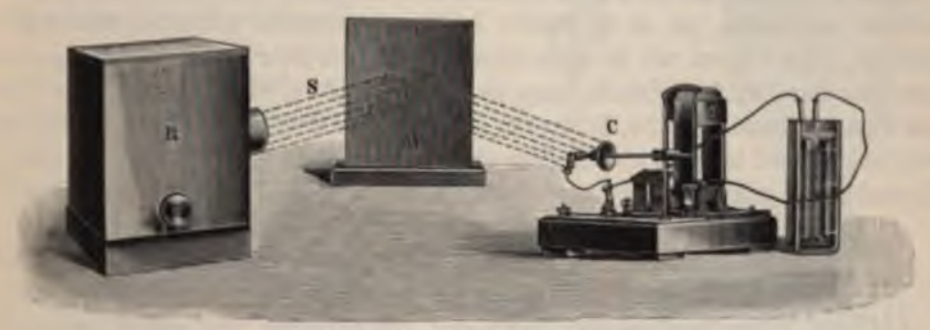

Messung der Länge elektrischer Wellen durch den Hertzschen Resonator. Vgl. Text, S. 377.

In den Weg eines elektrischen Wellenzuges stellen wir ein Drahtgitter. Durch dieses gehen elektrische Strahlen nur hindurch, wenn die Schwingungsrichtung der Entladungsfunken zu der Richtung der Drähte senkrecht steht. Vergleichen wir diese Erscheinung mit denen des Turmalins im polarisierten Lichte, so zeigt sich hier gerade die umgekehrte Wirkung der elektrischen Strahlen. Polarisierte Lichtstrahlen gehen nur durch den Turmalinkristall, wenn ihre Schwingungsrichtung mit der Kristallachse parallel ist, und in dieser Richtung werden auch die materiellen Elemente des Kristalles geordnet sein (S. 280). Bei den elektrischen Strahlen müssen diese Richtungen senkrecht aufeinander stehen. Die Umstände, welche jene Umkehrung verursachen, werden sicher einmal auf rein mechanischem Weg erklärt werden. Eine Andeutung dazu geben interessante Untersuchungen über die Durchlässigkeit verschiedener Wellenlängen durch Gitter. Das Verhältnis der Durchlässigkeit in der einen und der anderen Lage des Gitters zur Schwingungsrichtung ist nur bei den sehr kleinen Wellenlängen des Lichtes für die parallele Lage günstig, vermindert sich aber bereits für die Wärmestrahlen und nähert sich bei Vergrößerung der Wellenlängen den umgekehrten Verhältnissen, die wir bei den elektrischen Strahlen wahrnahmen. Es ist hier auch an die Wirkung von Beugungserscheinungen durch das Gitter zu denken, und man wird vielleicht einmal auf diese Weise ein elektrisches Beugungsspektrum mit hellen Linien, d. h. bestimmten Richtungen, beobachten, auf die die elektrischen Spannungen sich hinter dem Gitter verdichten. Auch kann man die elektrischen Wellen durch eine Vorrichtung, welche im Prinzip völlig dem Nörrenbergschen Interferenzrohre für die Schallschwingungen (S. 145) entspricht, sich gegenseitig aufheben lassen.


Nachweis der Form elektrischer Wellen durch den Hertzschen Resonator. Vgl. Text, S. 377.

Sehr wichtig sind auch die Untersuchungen von Hertz über die elektrischen Wellen, welche längs der Leitungsdrähte hinziehen. Die Versuchsanordnung hierzu ist aus der unteren Zeichnung, S. 380, ersichtlich. Die oszillierenden Schwingungen wurden durch zwei sich gegenüberstehende Metallplattenpaare auf zwei nebeneinander hergehende Drähte übertragen,

die auf der anderen Seite frei, also ohne leitende Verbindung, endigten. Die an den Drähten entlang laufenden Wellen wurden also an den Enden der Drähte reflektiert, wie etwa die Schallschwingungen in einer unten geschlossenen Pfeife (S. 143). Es bildeten sich wieder stehende Wellen, deren Längen mit dem Resonator gemessen wurden. Dabei ergab sich nun die merkwürdige Tatsache, daß die Wellenlänge durch die Natur der Drähte gar nicht beeinflußt wird; sie bleibt dieselbe bei Silber-, Kupfer- oder Eisendraht. Dies ist auffällig, weil wir doch gesehen haben, daß die verschiedenen Metalle dem galvanischen Strome sehr verschiedenen Widerstand entgegenstellen. Bei gleicher Wellenlänge und gleicher Schwingungszahl muß aber auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit die gleiche sein. Also trotz des erhöhten oder verringerten Widerstandes bleibt die Geschwindigkeit des Stromes die gleiche. Dieses Resultat steht mit allen unseren bisherigen Anschauungen im Widerspruch, der sich indes sofort aufklärt durch eine zweite Reihe von Versuchen, die in verschiedenen diese Drähte umgebenden Medien angestellt wurden. Hertz tauchte die Drähte nacheinander in Wasser, in Öl u. s. w. und fand nun sehr erhebliche Unterschiede der Wellenlängen. Z. B. wurden die Wellen in Wasser gegen die in Luft um 8,57mal kürzer, und ebensoviel kürzer muß deshalb auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in diesen umgebenden Medien sein. Wir stoßen hier auf dieselbe Wahrnehmung,



Reflexion elektrischer Strahlen. Vgl. Text, S. 377.

welche wir beim Schall machten, dessen Fortpflanzung eine andere im Wasser, in den Metallen u. s. w. ist, als in der Luft. Es folgt hieraus, daß die Träger jener elektrischen Erscheinungen gar nicht die Leiter, sondern die sie umgebenden Dielektrika sind. Wir haben eine entsprechende Erscheinung schon einmal auf S. 326 bei Besprechung der Kondensatorversuche festgestellt und verstehen nun auch die Wirkungen, durch welche die Funken- oder, noch besser, Wellentelegraphie zu stande kommt. Die Oszillationen der Funken versetzen den Äther in Schwingungen, die sich durch ihn ganz ebenso fortpflanzen wie die Schwingungen einer Glocke durch die Luft.

Die elektrischen Leiter scheinen nur eine gewisse Anziehungskraft auf die elektrischen Wellenzüge auszuüben, wie etwa poröse Körper auf sie umgebende Flüssigkeiten, und in diesem Sinn wirkt dann ihre innere Beschaffenheit, indem die Drähte z. B. erglühen, wenn zu große Mengen von Elektrizität in sie hineingepreßt werden, wie etwa ein Platinschwamm unter einem Wasserstoffstrom erglüht. Also gerade die Körper, welche wir Isolatoren genannt haben, sind die eigentlichen Träger und Leiter der elektrischen Erscheinungen; die sogenannten Leiter sind es, welche ihrer Ausbreitung Hindernisse entgegenstellen. Wir haben ja gesehen, wie die elektrischen Wellen von einem Metallschirme zurückgeworfen wurden. Ein dünner Stanniolüberzug

hervorruft, die jenen Schallschwingungen entsprechen und als solche gehört werden. Unsere Abbildung, S. 381, zeigt den Empfangsapparat für solche drahtlose Telephonie. Wir sehen den Hohlspiegel H, welcher die Strahlen eines Scheinwerfers auf der Sendestation auffängt und auf die Selenzelle S konzentriert. Durch diese geht ein Strom nach dem Telephon. Die Erzitterungen des Lichtstrahles durch die Stimme werden mit Hilfe eines Mikrophons in Schwankungen eines Stromes verwandelt, der ein Bogenlicht speist, das durch einen Scheinwerfer seine Strahlen zum Hohlspiegel der Empfangsstation gelangen läßt. Praktische Versuche mit solchen Apparaten auf dem Wannsee bei Berlin haben in neuester Zeit recht günstige Resultate ergeben.

Noch merkwürdiger sind die Entladungserscheinungen, die Hertz zuerst unter dem Einflusse violetter Strahlen und noch in erhöhtem Maße bei ultravioletten Strahlen beobachtete, und die später von Elster und Geitel in Wolfenbüttel eingehend studiert sind. Ein negativ geladenes Goldblattelektroskop verliert augenblicklich seine Ladung, wenn es von einer elektrischen Bogenlampe bestrahlt wird, ja man kann eine entsprechende Anordnung so empfindlich machen, daß die Entladung auch schon bei gewöhnlichem Tageslicht erfolgt. Die bei dämmernder Beleuchtung durch den Strom einer Zambonischen Säule auseinander gehaltenen Goldblättchen fallen sofort zusammen, wenn sie heller beleuchtet werden, und gehen erst wieder auseinander, nachdem sie in die Dunkelheit zurückgebracht worden sind. Das Seltsamste aber an dieser Erscheinung ist, daß sie bei einer positiven Ladung nicht auftritt. Das Licht wirkt hier also nur in einer Richtung. Außerdem zeigen sich nur, wie oben schon angedeutet, die kleineren Wellenlängen aktinoelektrisch.

Man kann es sich im allgemeinen wohl vorstellen, daß die gleichen Bewegungsformen des Lichtes und der Elektrizität aufeinander wirken müssen, wie wir im folgenden eine Reihe von Erscheinungen kennen lernen werden, die die Wärmebewegungen mit den elektrischen in Zusammenhang bringen; aber im besonderen harren doch diese merkwürdigen, erst in neuester Zeit aufgedeckten Beziehungen noch der Erklärung. In den noch gänzlich geheimnisvollen Becquerelstrahlen, die uns in einem folgenden Kapitel, S. 408, beschäftigen sollen, begegnen wir noch weit kräftigeren Wirkungen auf die elektrischen Spannungen.

h) Thermoelektrizität.

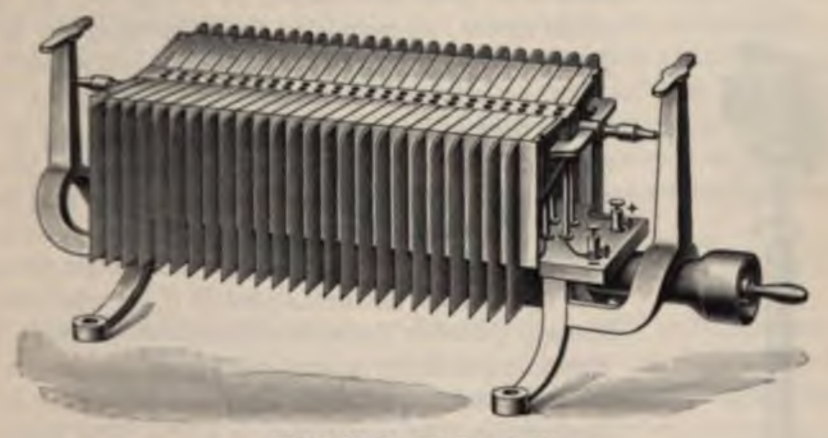
Im vorangehenden haben wir schon manche Beziehungen zwischen Elektrizität und Wärme kennen gelernt. Insbesondere haben wir elektrische Kraft in Wärme übergehen sehen, wenn z. B. einem galvanischen Strom ein zu großer Widerstand entgegentrat. Da wir bisher alle elektrischen Prozesse als umkehrbar erkannten, so daß Magnetismus Elektrizität und diese wieder Magnetismus erzeugt, oder daß Elektrizität Bewegung hervorruft, diese umgekehrt Elektrizität, so wäre es zu verwundern, wenn nicht auch durch Wärme unmittelbar elektrische Wirkungen entständen. Man muß immer wiederholen, daß es sich hier nur um Bewegungsformen in verschiedenen Größenverhältnissen handelt, die sich stets auszugleichen suchen.

In der Tat zeigt es sich, daß man sogar auf die allereinfachste Weise durch bloße Erwärmung Elektrizität frei machen kann. Fügt man in die Leitung eines Galvanometers ein Stück Eisendraht durch Verlötung mit dem Kupferdraht ein und erhitzt eine der Lötstellen, so gibt die Galvanometernadel einen Ausschlag: es entsteht ein Strom, und zwar ist derselbe von der heißen zu der kalten Stelle hin gerichtet. Alle anderen Metallverbindungen zeigen gleiche, nur quantitativ verschiedene Wirkungen. Es läßt sich (mit einigen für höhere Temperaturen auftretenden Verschiebungen) eine thermoelektrische Spannungsreihe aufstellen, wie es

eine voltaische gibt, doch stimmen beide Reihen nicht miteinander überein. Die Folge lautet: Selen, Tellur, Antimon, Eisen, Gold, hartes Platin, Magnesium, Zink, Silber, Kupfer, Blei, Quecksilber, Zinn, weiches Platin, Aluminium, Kobalt, Nickel, Wismut.

Je weiter in dieser Reihe die betreffenden Metalle voneinander entfernt stehen, desto kräftigere thermoelektrische Wirkungen bringen sie in der oben angedeuteten Weise vereinigt hervor, die stärksten also Selen und Wismut. In der Regel pflegt man bei den Experimenten eine Verbindung von Antimon und Wismut anzuwenden.

Es muß auffallen, daß dasselbe merkwürdige Element Selen, welches sich elektrisch lichtempfindlich erwies (S. 381), hier auch für die thermoelektrischen Wirkungen obenan steht. Offenbar hängen beide Eigenschaften mit einer besonderen molekularen Beschaffenheit des elementaren Stoffes zusammen, und es ist wohl möglich, daß die vermeintliche Lichtempfindlichkeit



Thermosäule. Vgl. Text, S. 384.

des Selens in Wirklichkeit nur auf den Wirkungen der Wärmestrahlen beruht, die von denen des gewöhnlichen Lichtes unzertrennlich sind.

Man kann den oben geschilderten Vorgang auch umkehren und einen galvanischen Strom durch eine solche aus zwei verschiedenen Metallen bestehende Leitung senden. Daß dadurch unter Umständen in den Drähten Wärme erzeugt wird, wissen wir schon (S. 337). Nun zeigt sich aber, daß auf einer der Lötstellen durch den Strom Kälte entwickelt wird, eine Erscheinung, die man den Peltiereffekt nennt. Die Kälte tritt an der Lötstelle auf, die bei Erwärmung denselben Strom hervorrufen würde, welcher jetzt die Kälte verursacht. Haben wir durch eine solche Thermokette eine Weile einen Strom geschickt und unterbrechen ihn dann, so wird durch die ungleiche Erwärmung der beiden Lötstellen alsbald aus ihr selbst ein Strom erzeugt, der in umgekehrter Richtung fließt. Es lassen sich also auch bei dieser Erscheinung alle Verhältnisse vollständig umkehren.

Es ist nicht einmal nötig, für diese Versuche verschiedene Stoffe anzuwenden. In der oben angeführten Reihe steht z. B. hartes und weiches Platin ziemlich weit auseinander, beide Arten desselben Metalles bringen also gleichfalls einen Thermostrom hervor. Die gleiche Erscheinung tritt auch bei anderen Metallen auf. Bei den einen geht der Strom durch die Erwärmung von der weichen zur harten Seite, bei anderen Stoffen umgekehrt. Auch bei der Berührung verschiedenartiger Flüssigkeiten entsteht durch Erwärmung Elektrizität.

Sehr eigentümlich sind ferner die erst in neuerer Zeit von v. Ettingshausen und Nernst entdeckten Beziehungen zwischen Magnetismus, Wärme und galvanischem Strom. Bringt man eine Wismutplatte in ein magnetisches Feld, so daß die Kraftlinien desselben die Platte senkrecht kreuzen, und erwärmt diese auf der einen Seite, so entsteht senkrecht zu der Ausbreitungsrichtung der Wärme ein galvanischer Strom; und umgekehrt, läßt man einen Strom durch die Platte fließen, erwärmt sich diese auf der einen Seite und kühlt sich auf der anderen ab.

Auch diese thermoelektrischen Erscheinungen hat man zur Erzeugung von Elektrizität in den sogenannten Thermosäulen verwendet (s. die Abbildung, S. 383). Durch Zusammenlöten einer Anzahl von wirksamen Metallpaaren in der Anordnung, daß immer die gleichwirkenden Lötstellen nebeneinander liegen, kann man alle durch dieselbe Wärmequelle erregen und erhält eine um so mehr verstärkte Wirkung, als man Metallpaare in der Säule vereinigt hat. Es sind auf diese Art Apparate gebaut worden, die durch solche direkte Umsetzung von Wärme in Elektrizität der Wirkung von 50 Bunsenelementen gleichkommen.



Langleys Bolometer.

Da wir in dem Galvanometer ein Mittel haben, sehr viel kleinere Mengen strömender Elektrizität zu messen, als in Wärme umgesetzt durch unsere Thermometer gemessen werden könnten, so gibt die Thermoelektrizität ein Mittel an die Hand, ganz ungemein kleine Temperaturdifferenzen zu bestimmen. Langley hat zu diesem Zwecke den sogenannten Bolometer erfunden, dessen Prinzip zwar nicht eigentlich ein thermoelektrisches ist (s. die nebenstehende Abbildung). Zu beiden Seiten einer Wheatstoneschen Brücke (S. 337) schaltete er eine Anzahl außerordentlich feiner Metalldrähte ein und ließ durch dieselben einen schwachen galvanischen Strom gehen. Zunächst wird alles ausgeglichen, so daß die Nadel keinen Strom anzeigt. Sobald aber nun auf der einen Seite der Brücke die Drähte erwärmt werden, wird ihr galvanischer Widerstand verändert, und es geht ein Strom über die Brücke, der gemessen werden kann. Es zeigt sich, daß man auf diese Weise eine Temperaturdifferenz von einem Hundertmillionsten Teil eines Zentigrades noch nachweisen kann. Langley hat auf diese Weise die Wärmemengen gemessen, die uns von den Fixsternen zustrahlen, jenen Sonnen, die sicher viele hunderttausendmal weiter von uns entfernt sind wie die unsrige. (Siehe auch S. 196.)

Von dem Wesen der thermoelektrischen Erscheinungen werden wir uns nach dem Vorangehenden unschwer eine Vorstellung machen können. Die innere Wärme haben wir als eine Bewegung innerhalb unserer molekularen Materiesysteme erkannt. Die Übertragung dieser Wärme auf die Umgebung geschieht durch die Vermittelung des Äthers, in welchem sich jene kleinsten Weltsysteme bewegen. Die elektrischen Erscheinungen dagegen sind Bewegungen dieses intermolekularen Mediums, sind Ätherwirbel, die aber nur unter dem Einfluß jener Bewegungen der molekularen Massen entstehen können. Die elektrischen Wirbel sind Rückwirkungen, die der Äther erfährt bei seiner Aufgabe, die Massenbewegungen zwischen den Molekülen zu vermitteln und diese miteinander auszugleichen. Es muß also eigentlich jede Zustandsänderung in dem molekularen Bau eines Stoffes Elektrizität erzeugen, weil dadurch auch die Spannungsverhältnisse des Äthers zwischen den Molekülen verändert werden, als welche wir

die elektrischen Erscheinungen in letzter Linie ansprechen müssen. In der Tat können wir kaum auf den Zustand eines Stoffes einwirken, ohne dabei Elektrizität zu erregen. Wenn wir diese in manchen Fällen nicht direkt auftreten sehen, so wird sie eben durch irgend eine ausgleichende Wirkung zum Verschwinden gebracht. Wie mächtig aber die Wärme auf den molekularen Zustand der Stoffe einwirkt, haben wir in dem Kapitel über diese Naturkraft ausführlich geschildert. Wir sahen namentlich, daß die Wärme den Bahnumfang der molekularen Bewegungen vergrößert, wodurch unmittelbar eine kräftige Wirkung auf das zwischenliegende Medium ausgeübt wird; in anderen Worten, es entstehen elektrische Wirbel, oder vorhandene werden entsprechend beeinflußt. Wenn umgekehrt an anderer Stelle hervorgerufene elektrische Wirbel zwischen die Moleküle gedrängt werden, so müssen sie ihrerseits deren Bewegungen in umgekehrter Weise beeinflussen, die Ätherbewegung geht in molekulare Bewegung, die Elektrizität in Wärme über. Bei einer überall gleichen Zusammensetzung des erwärmten Stoffes wird aber sofort ein Ausgleich stattfinden, denn es ist nirgends eine Ätherdruckdifferenz vorhanden, die zu einem Strömen Anlaß geben könnte. Wo dagegen zwei verschiedene Stoffe zusammenkommen, deren molekulare Bewegungen also nicht in gleicher Weise von der zugeführten Wärme beeinflußt werden, fehlt die Möglichkeit des inneren Ausgleiches. Der entstehende elektrische Strom nimmt die Richtung nach der geringeren Spannung hin, die einerseits durch die Wärmedifferenz, anderseits durch den besonderen molekularen Aufbau der beiden aufeinander wirkenden Stoffe bedingt ist.

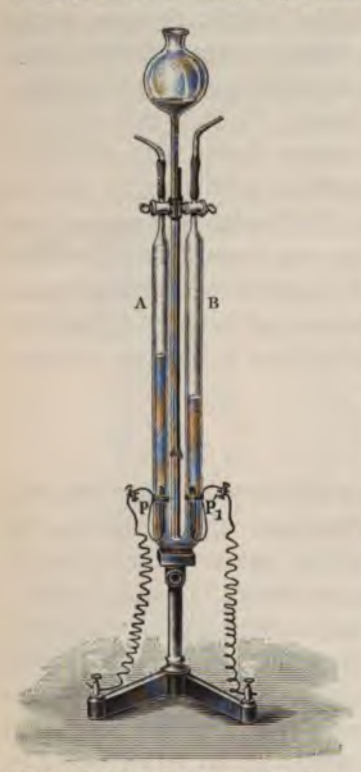
i) Die Elektrolyse.

Wie die Beziehungen der Elektrizität zur Wärme sich als völlig umkehrbar erwiesen, sind es auch die zwischen den chemischen und den elektrischen Erscheinungen. Einerseits erregen die chemischen Vorgänge in einer galvanischen Batterie einen Strom, und umgekehrt bringt ein außerhalb gebildeter Strom in chemischen Lösungen Zersetzungen hervor. Das volle Verständnis für diese Vorgänge, die den letzten Schlüssel zur Frage von der Entstehung des galvanischen Stromes geben, können wir indes erst erlangen, wenn wir die chemischen Erscheinungen selbst näher kennen gelernt haben, denen der nächste Hauptabschnitt dieses Werkes gewidmet ist. Erst am Schlusse desselben ist es uns möglich, ein zusammenfassendes Bild aller dieser ineinandergreifenden Vorgänge zu entwickeln. Besonders bei den Erscheinungen der Elektrolyse befinden wir uns auf einem Grenzgebiete, wo es schwer zu entscheiden ist, welche Vorgänge wir elektrisch, welche wir mehr chemisch nennen sollen. Ohne uns tiefer in das Wesen der Erscheinungen einzulassen, führen wir deshalb nur einige derselben hier an, die man gewöhnt ist, dem elektrischen Gebiete zuzuweisen.

Taucht man die beiden Enden einer Stromleitung, die Elektroden, in eine U-förmig gebogene, mit Wasser gefüllte Röhre AB, wie es die Abbildung S. 386 zeigt, und sorgt durch Verwendung von Platin dafür, daß die Leitungsenden pp_1 chemisch möglichst indifferent sind, damit die Zersetzungsprodukte des Stromes nicht mit dem Material des Leiters sogleich wieder eine Verbindung eingehen können, so steigen unter der Wirkung des Stromes auf beiden Seiten Blasen auf, die beweisen, daß das Wasser zersetzt wird. Dabei bildet sich auf der einen Seite noch einmal soviel Gas wie auf der anderen. Die chemische Untersuchung zeigt, daß das den doppelten Raum einnehmende Gas Wasserstoff, das andere Sauerstoff ist, und genau in den gleichen Raumverhältnissen verbinden sich diese beiden Elemente wieder zu Wasser. Der galvanische Strom hat es also in seine Bestandteile zerlegt und zwar derart, daß Wasserstoff

sich immer nur auf der negativen Seite des Stromes, der sogenannten Kathode, Sauerstoff auf der positiven, der Anode, bildet. Apparate von der beschriebenen Form, in denen elektrolytische Zersetzungen vorgenommen werden, nennt man Voltameter.

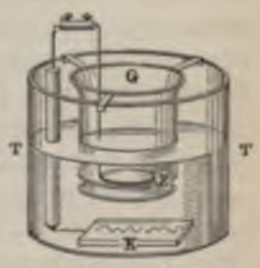
Auf die gleiche Weise kann man viele chemische Zersetzungen von Lösungen herstellen. Sie geschehen alle nach bestimmten Gesetzen, die in Beziehungen zur molekularen Beschaffenheit der beteiligten Stoffe stehen. Die Chemie hat diesen Wirkungen des galvanischen Stromes die wichtigsten Entdeckungen zu danken. Namentlich gab die Entdeckung Davys 1807, daß die Alkalien und sogenannten Erden keine einheitlichen Stoffe, sondern Verbindungen der zugleich gefundenen Erdmetalle mit Sauerstoff sind, einen epochemachenden Anstoß. Diese leichten Metalle sind auf chemischem Wege nur sehr schwer vom Sauerstoffe zu trennen, insbesondere ist dies der Fall bei dem Aluminium, das einen Hauptbestandteil der Tonerde, also eines sehr verbreiteten Stoffes, bildet. Nur wegen der umständlichen Darstellung blieb das Aluminium bis vor kurzem ein recht teurer Artikel, und erst in jüngerer Zeit hat man Mittel und Wege gefunden, durch starke Ströme dieses so ungemein verwendbare leichte Metall in größeren Mengen von der billigen Tonerde auszuscheiden, weshalb nun auch das Aluminium billig geworden ist und zu einem ganz neuen wichtigen Industriezweige Veranlassung gegeben hat. Gegenwärtig wird die Kraft des Rheinfalles bei Lauffen benutzt, um den Strom für die dort befindlichen großen Aluminiumwerke herzugeben.



Elektrolytische Zersetzung durch ein Voltameter. Vgl. Text, S. 385.

Auf der Abscheidung von Metallen aus ihren gelösten Verbindungen durch den galvanischen Strom beruht auch der Industriezweig der sogenannten Galvanoplastik. Bei den Daniell-Elementen bemerken wir, daß sich das Zink in der verdünnten Schwefelsäure allmählich auflöst, das Kupfer sich dagegen aus der umgebenden Kupfervitriollösung auf der Kupferplatte niederschlägt. Bringen wir auf dieser Seite des galvanischen Elementes irgend eine Form in leitende Verbindung mit der Kupferplatte, ohne daß diese Form gerade wieder aus Kupfer besteht, so schlägt sich auch auf ihr Kupfer nieder. Man pflegt zu diesem Zwecke dem Apparat eine andere Gestalt zu geben. In ein mit Kupfervitriollösung gefülltes Gefäß, TT auf unserer Abbildung, S. 387 oben, hängt man ein kleineres Gefäß G, das unten nur durch eine tierische Membran, also etwa durch ein Stück einer Schweinsblase, von dem Inhalte des Troges getrennt ist. Dieses kleinere Gefäß enthält verdünnte Schwefelsäure, in welche eine Zinkplatte Z taucht, und vertritt somit die Tonzelle des entsprechenden galvanischen Elementes. In dem unteren Gefäße befindet sich eine mit der Zinkplatte leitend verbundene Kupferplatte K. Auf diese legt man die meist aus Guttapercha gepreßte Form des galvanoplastisch herzustellenden Gegenstandes, welche, um auf ihrer Oberfläche leitend zu sein, mit einer feinen Schicht von Graphit überzogen wird. Dann scheidet sich nach und nach das Kupfer auf ihr ab. Je langsamer dies geschieht, desto feinere Einzelheiten weist die Kopie auf. Man verwendet deshalb oft mehrere Tage auf

den Prozeß. Will man auf Kosten der Feinheit die Herstellung beschleunigen, so braucht man nur einen kräftigen Strom in einen Trog von der beschriebenen Art zu leiten und hat nun selbstverständlich das kleinere Gefäß mit der Zinkplatte nicht mehr nötig, das ja nur zur Stromerzeugung verwendet wurde. Auf dieselbe Weise werden auch Gegenstände galvanisch versilbert und vergoldet.



Galvanoplastischer Apparat. Vgl. Text, S. 386.

Ebenfalls auf einem elektrolytischen Transport beruht die Wirkung der sogenannten **Akkumulatoren**, die heute in der Elektrotechnik eine so hervorragende Rolle spielen, und von denen die untere Abbildung einen dreizelligen mit Platten und Schaltungen wiedergibt. Wir können ein galvanisches Element aus einer Platte von **Blei** und einer anderen aus **Bleisuperoxyd** herstellen, die in verdünnte Schwefelsäure getaucht sind. Es entsteht dann ein Strom von etwa 2 Volt Spannung, der im Inneren vom Blei zu der Oxydplatte fließt. Dabei bilden sich Zersetzungsprodukte, und zwar auf der positiven Seite Bleisulfat und Wasser, auf der negativen aber nur Bleisulfat, das sich hier auf dem metallischen Blei niederschlägt. Wir sehen also, daß hierdurch die beiden Platten nach und nach die gleiche Zusammensetzung an ihrer Oberfläche erhalten. Sie bestehen schließlich beide aus Bleisulfat, und damit hört die Wirkung auf; die Akkumulatoren sind **entladen**. Von dem Grade der Entladung unterrichtet man sich auf sehr einfache Weise, indem man in die Flüssigkeit der Akkumulatoren einen Aräometer (S. 118) taucht, der den Grad der Verdünnung der Schwefelsäure unmittelbar anzeigt; denn weil der elektrolytische Prozeß zugleich Wasser bildet, so hält die Verdünnung mit der Entladung gleichen Schritt. Wenn in die entladenen Akkumulatoren ein Strom, etwa aus einer Dynamomaschine, in umgekehrter Richtung geschickt wird, so bilden sich die chemischen Produkte wieder vollständig zurück, so daß dann die eine Platte wieder nur aus Blei, die andere aus Bleisuperoxyd besteht. Gleichzeitig wird auch das freigewordene Wasser wieder absorbiert, der Säuregehalt wird größer; man kann also ebenso den Fortschritt der Ladung mit dem Aräometer verfolgen wie die Entladung. Ist die Ladung vollständig, so bildet sich bei weiterer Stromzuführung Wasserstoff auf der Bleiseite und entströmt den Akkumulatorgefäßen. Daher rührt ihr oft störender übler Geruch, der aber durchaus vermieden werden kann, wenn man den Ladungsprozeß gehörig überwacht. Bei normaler Tätigkeit entwickeln die Akkumulatoren keinen Wasserstoff.



Akkumulatorzellen.

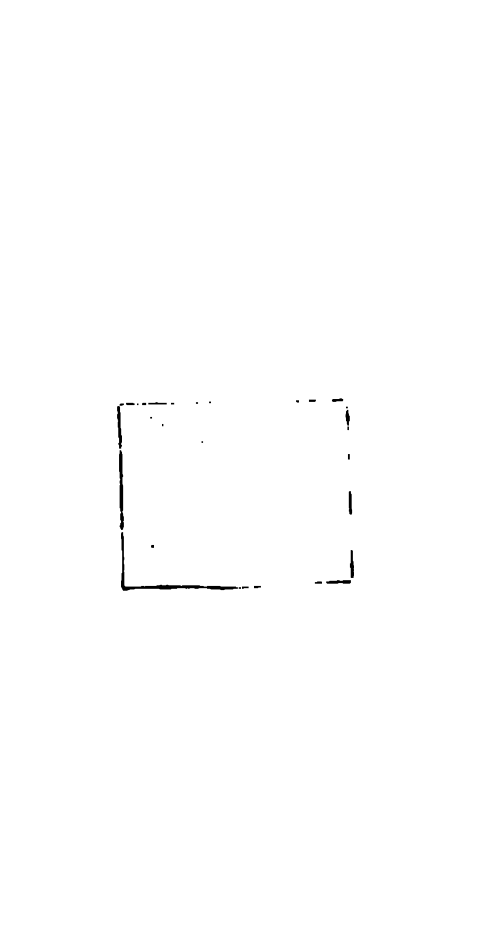
Die Akkumulatoren sind ein wichtiges Hilfsmittel geworden, um, wie ihr Name schon sagt, elektrische Kraft aufzuspeichern. Man versendet in einem Akkumulator die Elektrizität wie irgend einen Gegenstand in einer Kiste, denn ihre Ladung verliert sich nur sehr langsam, solange man den Stromkreis nicht schließt. Meist dienen aber diese Vorrichtungen dazu, eine Kraftanlage möglichst gleichmäßig auszunutzen. Dient sie z. B. zur elektrischen Beleuchtung, so wird von ihr bei direkter Stromlieferung am Tage fast gar nichts, am Abend sehr viel verlangt. Wenn man aber eine Akkumulatorenbatterie zur Verfügung hat, so ladet man diese am Tage durch die Maschine und kommt dafür am Abend mit einer geringeren Maschinenanlage aus, indem nun

Maschine und Batterie zugleich Strom abgeben können. In öffentlichen Gebäuden, wie Theatern, wo ein plötzliches Ausbleiben des Lichtstromes verhängnisvolle Folgen für die Sicherheit haben würde, sind die Akkumulatoren sehr erwünschte Reservemagazine, auf die man bei den niemals ganz zu vermeidenden Betriebsstörungen der Maschine zurückgreift, wodurch eine teure Reservemaschine oft erspart wird. Man hat die Akkumulatoren in jüngerer Zeit auch im Verkehrswesen zur Bewegung von Wagen benutzt, für welche man die Ladung immer einer feststehenden Kraftstation entnimmt. Durch den von den Akkumulatoren wieder abgegebenen Strom wird alsdann eine Dynamomaschine bewegt, welche ihre Rotation auf die Räder des Fahrzeuges überträgt. Störend wirkt hier für die betreffenden Fahrzeuge, wie Automobile und auch Straßenbahnwagen, die große Schwere der bleigefüllten Akkumulatoren, die immer mitgeführt werden müssen. Bei den Berliner Straßenbahnen ist die dadurch hervorgerufene Schwerfälligkeit der Akkumulatorenwagen oft verhängnisvoll geworden, so daß man zu der Stromzuführung durch Leitungen zurückzukehren sich gezwungen fühlte.

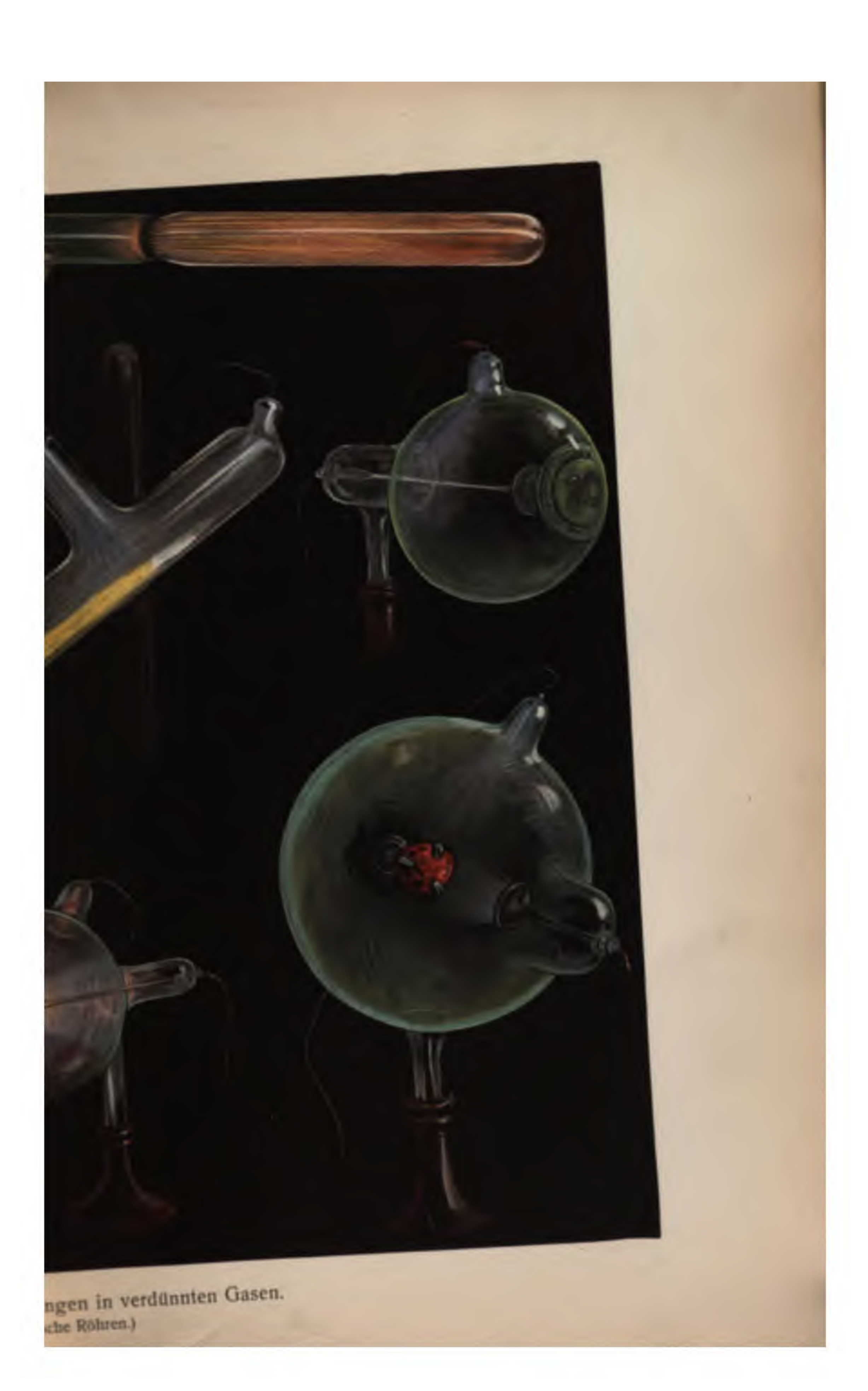
Vor kurzem ist Edison mit einem neuen Akkumulator hervorgetreten, der insofern einen wesentlichen Vorteil vor den früheren bietet, als das wirksame Metall nicht Blei, sondern Eisen und Nickel ist, wodurch das Gewicht einer solchen Batterie wesentlich vermindert wird. Hierauf würde es natürlich allein nicht ankommen, sondern auf das Verhältnis der Kraft des Akkumulators zu seiner Schwere; es ist zu bestimmen, bis zu welcher Höhe der Akkumulator sich durch seine eigene Kraft tragen könnte. Dieses Verhältnis stellt sich auch für den neuen Edison-Akkumulator erheblich günstiger als für den alten Bleiakkumulator. Es wurde berechnet, daß der letztere sein eigenes Gewicht auf eine Höhe von etwa 4 km heben kann, bis er entladen ist, der neue Akkumulator dagegen auf 11 km. Auf seine chemische Wirkungsweise können wir uns hier nicht einlassen; es sei nur bemerkt, daß Edison seine wirksamen Stoffe, fein verteiltes Eisen auf der positiven, fein verteiltes Nickel auf der negativen Seite, in Brikettform gepreßt angebracht hat.

10. Die neuen Strahlen (Kathoden-, Röntgen- und Becquerelstrahlen).

Wir gelangen nun zu einer Reihe von Erscheinungen, deren erste Glieder zwar zweifellos im wesentlichen elektrischer Natur sind, aber stufenweise und zuerst unbemerkt in ein neues, noch fast gänzlich geheimnisvolles Gebiet hinüberspielen, das selbst bis zu einem so hohen Grade rätselhaft ist, daß das oberste von allen Gesetzen der Natur, das von der Erhaltung der Kraft, hier keine Geltung mehr zu haben scheint. Da kein ernster Forscher an eine Umstoßung dieses obersten Prinzips alles Naturgeschehens glauben kann, arbeitet man in den letzten Jahren mit geradezu fieberhafter Anstrengung, um dieses große Rätsel zu lösen. Es wird gelöst werden. Dieser Widerspruch wird von geheimnisvollen, dunkeln Strahlen hervorgerufen, welche von gewissen Substanzen ohne jede sichtbare Erregung in unglaublich große Entfernungen jahrelang ausgesandt werden. Augenblicklich befinden wir uns gegenüber diesen Substanzen, die nur in sehr geringen Mengen bisher hergestellt wurden und deshalb noch wertvoller als Gold und Edelstein sind, in derselben Lage wie die Menschen, welche die ersten Magnetsteine auffanden und an ihnen das Wunder sahen, wie die allgemeinste von allen Erscheinungen, die Schwere, durch sie aufgehoben wurde. Ein ganz neues Gebiet von Naturwirkungen, vielleicht so groß, so interessant und wertvoll wie das der Elektrizität, scheint sich hier durch eine ebenso enge Pforte eröffnen zu wollen, wie sie Galvanis, Voltas und Oersteds Fundamentalversuche zuerst







ngen in verdünnten Gasen.
che Röhren.)

fast unbemerkt auftaten. Heute arbeitet ein ganzes Heer von Forschern mit mächtigen Apparaten an der Erschließung jenes unbekannten Gebietes. Wer wird den Schlüssel finden, wer hat ihn vielleicht schon gefunden? Wir wissen es noch nicht. Deshalb ist zunächst noch jedes Detail, das man an den neuen Erscheinungen entdeckt, von Wichtigkeit. Wir mußten demnach für die Darstellung in diesem Werk anders verfahren als in den vorangegangenen Kapiteln, wo es sich um Erscheinungen handelte, die, wenigstens in ihren Hauptzügen, sich in unsere Grundanschauungen systematisch ordnen, so daß wir das Wichtige von dem Unwichtigen sondern konnten. Für die neuen Strahlen blieb nur die Wahl, sie entweder ganz beiseite zu lassen, oder trotz der großen Fülle des vorliegenden Materials möglichst alles in gedrängter Kürze zu geben, was davon in den letzten Jahren erforscht worden ist, da eben für die Auswahl dessen, was in der Folge wichtig sein wird, keine oder doch nur unsichere Anhaltspunkte vorhanden sind.

Um in den Gegenstand einzudringen, beginnen wir mit der Schilderung der Funkenentladungen in verdünnten Gasen, die bereits seit einigen Jahrzehnten bekannt sind.

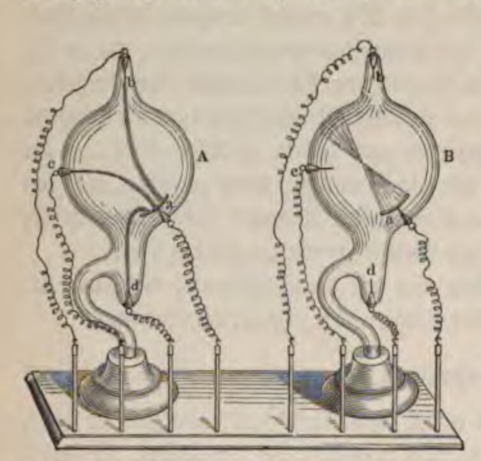
a) Die Kathodenstrahlen.

Läßt man den elektrischen Funken, etwa aus einem Ruhmkorffschen Induktor (S. 361), durch eine Glasröhre schlagen, in welcher man die Luft verdünnt hat, so nimmt der Funke verschiedene Gestalten und Eigenschaften je nach dem Grade der Luftverdünnung an. Wir hatten gesehen, daß die Luft ein schlechter Leiter ist. Erst nachdem die Spannung an den Elektroden eine gewisse Größe erlangt hat, vermag sie den Widerstand der freien Luft zu überwinden; dann springt der Funke über und reißt Teile des Elektrodenmaterials mit, so daß das Spektrum des betreffenden Metalles in dem Lichte des Funkens erscheint. Entfernt man nun in dieser sogenannten Geißlerschen Röhre mehr und mehr dieses Hindernis der Luft, so erfolgt der Austausch der beiden Elektrizitäten mit immer größerer Leichtigkeit, wenigstens bis zu einem bestimmten Grade der Verdünnung. Statt der Funkenentladung tritt stufenweise die Glimmentladung ein, ein ungemein reizvoller Anblick, der vielfach zu elektrischen Lichtspielen verwendet worden ist. Bei beginnender Luftverdünnung wird der Funke allmählich unscheinbarer, es bildet sich um die Funkenbahn ein Lichtschein, und schließlich hört der Funke ganz auf. Der Lichtschein breitet sich, von der positiven Elektrode, der Anode, beginnend, nach und nach über die ganze Röhre aus, folgt ihren etwaigen Krümmungen, bis er in die Nähe der anderen Elektrode, der Kathode, gelangt, ohne diese jedoch völlig zu erreichen. Dieses Glimmlicht ist farbig und geschichtet, wie es die Figur 1 unserer hier beigegebenen farbigen Tafel zeigt. Verfolgt man die Erscheinung im Spektroskop, so sieht man, daß hier zwei ganz verschiedene Spektren allmählich ineinander übergehen. Das erste besteht aus hellen Linien, die man früher für die der Metalldämpfe der Elektroden hielt, später aber als Linien der Spektren der Luftgase erkannte, die dem des gewöhnlichen elektrischen Funkens ähnlich sind. Dieses Spektrum geht bei geringerem Drucke mehr und mehr in das sogenannte sekundäre Luftspektrum mit breiten, leuchtenden Bändern über.

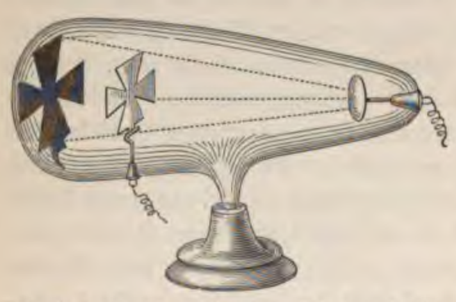
Die Kathode scheint an diesen Entladungsvorgängen zunächst unbeteiligt zu sein. Sie wird von einer leuchtenden Schicht umgeben, der eine dunkle Sphäre, der sogenannte dunkle Kathodenraum, folgt; ihn wieder umhüllt eine wolkige Lichtmasse, die zu der positiven, geschichteten Entladung keine Beziehungen zu haben scheint. Das positive und das negative Licht haben verschiedene Farben. In einer mit Luft gefüllten Röhre ist das erstere rötlich, das letztere bläulich.

So stellen sich die Erscheinungen in einer Geißlerröhre dar, wenn das Quecksilberbarometer im Innern der Röhre einen Druck von 5 bis 1 mm, gegenüber dem gewöhnlichen Luftdruck der

Umgebung von 760 mm, anzeigt. Die Röhre enthält also $^1/_{760}$ bis $^5/_{760}$ des Luftquantums, welches einen der Röhre entsprechenden Raum der Umgebung erfüllt. Man sah, daß die Überführung der Elektrizität auf dem unterbrochenen Leitungswege in der Funkenstrecke bei entsprechender Verdünnung des Gases nicht von den metallischen, von der Elektrode losgerissenen Teilchen, sondern von jenen Gasen selbst übernommen wird. Wir haben uns vorzustellen, daß Moleküle des Gases ebenso zwischen den Elektroden hin- und zurückfliegen, wie die Holundermarkkügelchen bei dem auf S. 316 geschilderten elektrischen Tanz. Auf ihrem Wege begegnen sich viele dieser Teilchen aus entgegengesetzten Richtungen, die durch den Anprall in Wärmeschwingungen versetzt werden. Dadurch entsteht die Erscheinung des Glimmlichtes, dessen Schichtung sich vielleicht dadurch erklärt. Wir haben früher (S. 362) gesehen, daß der angewandte Strom ein sogenannter Integralstrom ist, der auf und ab schwankt, gewissermaßen stoßweise wirkt. Somit müssen die hin- und zurückeilenden Gasteilchen stehende Wellen da bilden, wo besonders viele Zusammenstöße stattfinden. Sie entsprechen durchaus den Kundtschen Staubfiguren in Röhren, die wir auf S. 142 dargestellt haben; auch durch den elektrischen Funken wird Lykopodiumpulver in freien Röhren zu solchen Figuren gruppiert. Auf diese Weise lassen sich jene Schichtungen einfacher erklären als durch eigentliche elektrische Ätherwellen, die hier wahrscheinlich nicht in Betracht kommen. Die Geschwindigkeit der Gasteilchen muß sich, bei sonst gleichen Verhältnissen, offenbar zunächst nach ihrer elektrischen Ladung richten, die ja die Ursache ihrer Bewegung ist, und dann nach der Leichtigkeit, mit welcher sie den Raum durchdringen, d. h. nach dem Grade der Verdünnung, dem Gasdruck. Die kinetische Gastheorie, welche die Hauptgrundlage unserer atomistischen Anschauung der Erscheinungen bildete, und die wir auf S. 156 u. f. behandelt haben, zeigt ja, daß die Gasmoleküle ohnehin eine sehr schnelle Bewegung haben, die mit dem Grade der Verdünnung steigt. Jene kinetische, den Wärmezustand des Gases bedingende Bewegung der Moleküle wird durch die Elektrizität in bestimmte Richtung gebracht und zugleich erhöht. Da die Gasmoleküle aber die Glaswand der Röhre nicht durchdringen können, so müssen sie irgendwo außerhalb der Funkenstrecke wieder zurückkehren und bilden nun einen Wirbel, der sich in jenen Schichtungen verrät. Es wäre aber voreilig, aus dieser Erscheinung zu folgern, daß jene Gasteilchen nun ausschließlich die Übertragung der Elektrizitäten übernommen haben. In freier Luft sahen wir, daß diese Gasteilchen zugleich mit den losgerissenen Metallteilchen daran beteiligt waren. Als dann bei der Luftverdünnung die Spannung an den Elektroden abnahm, fehlte die genügende Kraft für jenes Losreißen



Kathodenstrahlen bei verschiedener Verdünnung. Vgl. Text, S. 391


Kathodenstrahlen-Schatten. Vgl. Text, S. 391.

schwererer Moleküle des Metalles. Auch die Erhitzung, die mit größerem Widerstande wächst und das Losreißen begünstigte, wurde geringer. Aber alle im vorangegangenen Kapitel geschilderten Vorgänge bewiesen ja, daß die eigentliche Übertragung der Elektrizität der Äther besorgt, der zwischen den Molekülen hindurchströmt. Wie also das Losreißen der Metallpartikel nur eine Begleiterscheinung war, so kann es in der Geißlerröhre auch das Fortreißen der Gasteilchen in der Entladungsbahn sein. Dies wollen wir im Auge behalten, ohne jetzt schon eine Entscheidung darüber zu suchen. Jedenfalls beweisen die merkwürdigen Lichtgruppierungen um die Kathode, daß hier noch andere Dinge mitspielen.

Wir wenden uns nun den Entladungserscheinungen auf der anderen Seite, der Kathode, zu und erkennen sehr bald, daß das hier auftretende Glimmlicht offenbar von ganz verschiedener Art ist als das von der Anode ausgehende. Es ist nicht geschichtet, folgt nicht den Krümmungen der Röhre und ist nicht unbedingt gegen die Anode hin gerichtet; wenn man einen Gegenstand vor dasselbe hält, so geht es nicht um ihn herum, wie das Anodenlicht, sondern wird von diesem sogar aufgehalten. Demnach ist es eine Strahlungserscheinung.

Nun aber treten sehr wesentliche Formänderungen in der Röhre ein, wenn man die Verdünnung des Gases noch weiter steigert, was erst in neuerer Zeit, namentlich nach der Erfindung der Quecksilberluftpumpe, bis zu fast völliger Entleerung oder doch bis zu ganz verschwindend kleinem Druck von etwa 0,00001 mm gelingt. Das Anodenlicht weicht mehr und mehr zurück, das Kathodenlicht dagegen dehnt sich aus, wenn auch nicht in gleichem Maße, so daß der dunkle Zwischenraum, der beide Lichter trennt, größer wird. Endlich verschwindet das Anodenlicht ganz, und es werden die eigentlichen Kathodenstrahlen sichtbar, die zuerst Kathode mit Anode verbinden, schießlich aber ohne Rücksicht auf diese ganz geradlinig werden. Auf S. 390 oben ist eine Röhre mit einer Kathode a und drei Anoden bcd in zwei Stadien der Verdünnung abgebildet. Bei A teilen sich die Kathodenstrahlen, um sich mit den drei Anoden zu verbinden; bei B gehen sie geradlinig bis zur Glaswand. Die Kathodenstrahlen sind an sich nicht sehr intensiv, haben aber eine viel größere Energie, als es ihr Leuchten allein voraussetzen würde; denn wir sehen z. B., wie die Stelle der Röhrenwand, die der Kathode gegenüberliegt, die sogenannte Antikathode, in lebhaft grün fluoreszierendem Lichte strahlt, als würde sie von einem hellen grünen Lichte beschienen, dessen Energiequelle nur die Kathode sein kann (s. Figur 2 unserer Farbentafel bei S. 389). Diese aber leuchtet nur sehr schwach. Wir haben es hier also schon mit wenigstens teilweise unsichtbaren Strahlen zu tun, die zuerst von Hittorf bereits 1869 beschrieben wurden, und deren Kenntnis seit 1876 von Goldstein wesentlich erweitert ist. Ihre Bedeutung ist damals in weiteren Kreisen wenig gewürdigt worden, während sie erst viel später von Crookes wieder beschrieben und dadurch allgemeiner bekannt wurde.


Kathodenmühle. Vgl. Text, S. 392.

Die Kathodenstrahlen kümmern sich nicht um die Lage der Anode; sie gehen ganz geradlinig weiter, so daß bei gebogenen Röhren die Antikathode eine von der Anode ganz verschiedene Lage haben kann. Stellt man einen Gegenstand, z. B. ein Kreuz, in den Weg jener Strahlen, so wirft es einen scharfen Schatten, der sich von dem grünleuchtenden Hintergrunde der Antikathode abhebt (s. die untere Abbildung, S. 390). Läßt man die Kathodenstrahlen auf ein

leichtes Rädchen in der fast völlig leeren Röhre fallen, das in der Art wie die Lichtmühlen, Radiometer, gebaut ist, so dreht sich diese „Kathodenmühle“, als ob sie von einem Strom von Materie getroffen würde, der von der Kathode ausgeht (s. die Abbildung, S. 391). In umgekehrter Richtung aber dreht sich ein solches Rädchen, wenn man seine Speichen so einrichtet, daß sie selbst von der einen Seite diese Strahlen aussenden und damit einen Gegendruck ausüben. Da wir es hier mit Stoßwirkungen zu tun haben, müssen sie auch von Wärmeerscheinungen begleitet sein. In der Tat bilden die austretenden Strahlen, wenn wir der Kathode die Form eines **Hohlspiegels** a geben, einen **Brennpunkt**, in welchem ein dünnes Platinblech b in lebhaftes Glühen gerät (s. die untenstehende Abbildung). Einen ganz herrlichen Anblick gewähren manche Stoffe, namentlich Kristalle, wie der Rubin, sowie Zinkblende, wenn sie in diese Strahlen gebracht werden. Sie leuchten auf, als würden sie von einem intensiven Lichte getroffen, oder als wären sie selbstleuchtend. In Figur 3 der Farbentafel bei S. 389 ist diese Erscheinung dargestellt. Einige dieser Stoffe strahlen in einem Lichte, das ihr äußeres Ansehen nicht vermuten läßt, wie ja auch das gewöhnliche farblose Glas grüne Strahlen aussendet.



Brennpunkt des vom Hohlspiegel reflektierten Kathodenlichts.

Diese **Phosphoreszenzerscheinungen** wurden 1900 von **Goldstein** weiteren Untersuchungen unterworfen, wobei wieder die merkwürdigsten Tatsachen zutage gefördert wurden, was fast jedesmal geschieht, wenn man in dieses Gebiet der unsichtbaren Strahlen tiefer eindringt. Goldstein zeigte, daß in den meisten Fällen das bisher beobachtete Phosphoreszenzlicht nicht der untersuchten Substanz selbst, sondern ganz minimalen Verunreinigungen derselben angehört, die durch keine noch so subtile chemische Methoden mehr nachzuweisen sind. Zeigt eine soweit als möglich reine Substanz ein Licht von bestimmter Farbe, so kann der Zusatz von ein Zehnmillionstel eines anderen Stoffes ein so starkes Phosphoreszieren in einer anderen Farbe durch Einwirkung der Kathodenstrahlen hervorrufen, daß die erste dadurch völlig überstrahlt wird. Fügt man aber größere Mengen jenes Stoffes zu, so nimmt von einem gewissen Prozentsatze das Leuchten wieder ab und kann ganz aufhören, wenn größere Mengen dieses in verschwindenden Spuren so intensiv leuchtenden Stoffes dem Kathodenlicht ausgesetzt werden. Figur 4 und 5 unserer Farbentafel (S. 389) zeigen diese reizvollen Erscheinungen farbig leuchtender Kaskaden von elektrisch erregten Stoffen, die beim Umkippen der Röhren durch die Kathodenstrahlen hervorgezaubert werden. Man wird deshalb zu der Vermutung geführt, daß jenes Leuchten überhaupt nicht von den Stoffen ausgeht, die wir kennen, sondern von unnachweisbar geringen Beimengungen noch unbekannter Substanzen. Die Wirkungen eines solchen selbst noch unentdeckten Stoffes werden wir in dem Radium noch kennen lernen. Anderseits meint Goldstein, daß das am häufigsten wahrgenommene blaue bis violette Phosphoreszenzlicht zu einem Teil ganz geringen Spuren von Wasser, die nicht mehr entfernt werden können, zuzuschreiben ist. Es ist eine ganz wunderbare Tatsache, die auf diesem ganzen Gebiete der unsichtbaren Strahlen uns immer deutlicher vor Augen tritt, daß die Natur ihre größten Wirkungen nicht durch die großen Massen, die wir in Händen haben, sondern durch die unnachweisbar kleinsten Massenteilchen einer Welt ausübt, die wir auch mit unseren noch so verschärften Augen niemals erfassen werden.

Mit diesen Phosphoreszenzerscheinungen ist noch eine andere verknüpft, die wir hier nur kurz erwähnen können. Das sind die von Goldstein zuerst gefundenen sogenannten Nachfarben. Unter der Wirkung der Kathodenstrahlen verändern gewisse Substanzen dauernd ihre Farbe und werden zugleich lichtempfindlich, so daß sie ihre gewöhnliche Farbe erst wiedergewinnen, wenn sie vom Tageslicht bestrahlt werden.

Da wir bei diesen merkwürdigen Strahlen einen Brennpunkt entstehen sahen, in welchem sie sich kreuzen müssen wie in allen optischen Instrumenten, denn diese Kreuzung ist ja nur eine rein geometrische Notwendigkeit, so ist mit logischer Sicherheit vorauszusagen, daß ein von diesen Strahlen entworfenes Bild ein umgekehrtes sein muß. Bei dieser Schlußfolgerung kommen überhaupt keine physikalischen Eigenschaften der Dinge in Betracht, sondern nur rein mathematische, die unbedingt eine allgemeine Gültigkeit für sich in Anspruch nehmen. Wie groß war deshalb das Erstaunen, als Goldstein trotz der deutlich beobachteten Kreuzung der Kathodenstrahlen ein aufrechtes Schattenbild von ihnen entworfen sah. Dies war bereits einer der scheinbar unbedingten Widersprüche gegen unumstößliche Wahrheiten, die man an diesen wunderbaren Strahlen bemerkte; und wenn er sich auch bald aufklärte, so ist er doch charakteristisch für die Schwierigkeiten, die diese ganze Erscheinungsgruppe bietet. Es zeigte sich, daß von jedem Flächenelement der Kathode Strahlen ausgehen, die eine sehr verschiedene Lage in Bezug auf die Ausstrahlungsfläche einnehmen, je nach dem verschiedenen Widerstand, den sie noch in der Röhre antreffen. Hieraus folgt, daß je nach der elektromotorischen Kraft, mit welcher der Kathodenspiegel die Strahlen entsendet, deren Konvergenzpunkt seine Entfernung von dem Spiegel ändert. Je größer diese Kraft oder je niedriger der Gasdruck in der Röhre ist, desto gerader gehen die Strahlen vom Spiegel aus und desto weiter rückt der Konvergenzpunkt vom Spiegel hinweg. Würden die unbekannten Träger dieser Strahlen senkrecht von den Flächenelementen des Spiegels ausgehen, so müßten sie sich im geometrischen Brennpunkt treffen, was bei geringerer Evakuierung auch bis zu einem gewissen Grade stattzufinden scheint. Mit je größerer Leichtigkeit aber die Strahlen den Spiegel verlassen, desto weniger kümmern sie sich um die Form desselben. Auf diese Art entstehen so eigentümliche Erscheinungen, wie sie Figur 6 und 7 unserer Farbentafel wiedergeben. In Figur 6 dient als Kathode ein gewöhnliches Zehnpfennigstück, dessen Bild vergrößert auf die Röhrenwand projiziert wird. In Figur 7 hat die Kathode die Form eines Sechsecks. Es tritt nun die auffallende Erscheinung ein, daß die von ihm ausgehenden Strahlen einen Stern bilden, dessen sechs Strahlen senkrecht zu der Mitte je einer Seite des Sechsecks orientiert sind.

Stellt man eine Metallplatte in den Weg der Kathodenstrahlen, so werden sie von ihr teilweise zurückgeworfen, aber nicht wie von einem Spiegel und nicht nach dessen Gesetzen. Es ist ganz gleichgültig, ob die Platte poliert oder rauh ist. Für die Teilchen, welche hier in Bewegung sind, ist auch eine glatte Fläche als rauh zu betrachten; so klein sind sie. Die Reflexion ist deshalb eine diffuse. Sie wurde zuerst von Goldstein nachgewiesen, und Starke zeigte dann, daß sie mit der Dichtigkeit der reflektierenden Stoffe abnimmt, die also in die Reihenfolge Platin, Silber, Kupfer, Zink, Aluminium, Ruß zu bringen sind. Ruß absorbiert bekanntlich die gewöhnlichen Strahlen vollständig, die Kathodenstrahlen aber läßt er ziemlich ungehindert durchgehen. Auch sonst ist das Reflexionsvermögen des gewöhnlichen Lichtes anderen Bedingungen unterworfen, die mit der Oberflächenbeschaffenheit der betreffenden Stoffe zusammenhängen, während diese für die Kathodenstrahlen keine Rolle spielt. Aluminium, das diese Strahlen am wenigsten gut von allen übrigen Metallen zurückwirft, läßt sie dagegen in

dünnen Schichten frei durchgehen; es ist durchsichtig für Kathodenstrahlen, wie im übrigen alle genügend dünnen, festen Substanzen. Lenard hat 1894 diese Eigenschaft benutzt, um diese Strahlen in die freie Luft hinaustreten zu lassen, damit er sie besser untersuchen konnte als in dem kleinen Raume der evakuierten Röhre. Er versah eine solche Röhre, der man inzwischen meist Birnenform gab, an dem Ort ihrer Antikathode mit einer Öffnung, die wieder durch ein Aluminiumblatt verschlossen wurde, das stark genug war, um bei der Entleerung der Röhre den äußeren Luftdruck zu ertragen, aber die Kathodenstrahlen durchließ. Man nennt eine solche Vorrichtung ein Aluminiumfenster. Die oben angegebene Jahreszahl, zu welcher diese Vorrichtung zuerst angewandt wurde, ist interessant, denn ein Jahr darauf fand Röntgen zufällig seine berühmten Strahlen. Lenard hatte aber, als er jene Vorrichtung gebrauchte, zugleich Röntgenstrahlen vor sich, und es war nur ein ganz kleiner Schritt zu tun, um zu ihrer Entdeckung zu gelangen.

In den Kathodenstrahlen haben wir es mit einem strahlenden und einem strömenden Phänomen zugleich zu tun. Ein Rädchen, das, wie schon berichtet, von den direkten Strahlen eine abstoßende Wirkung erfährt, dreht sich dagegen in umgekehrter Richtung, wenn man es aus der Strahlenachse seitlich verschiebt (Swinton). Die Materie der Kathodenstrahlen verläßt also die Röhre nicht; zunächst von ihr hinweggetrieben, muß sie irgendwo wieder umkehren und einen Kreislauf ausführen. Jedenfalls spielen aber auch Ströme hierbei eine Rolle, die von der Anode ausgehen, nur haben diese wohl viel geringere Kraft. Stellt man eine unipolare Röhre her, in welche also nur eine Elektrode eingeführt ist, und leitet die andere zur Erde ab, so brechen nach Battelli und Magri gleichfalls Strahlen in das Vakuum aus, während in der freien Luft unter diesen Umständen bekanntlich keine Ableitung der Elektrizität stattfinden würde. Aber die nun entstehenden Strahlen haben zugleich die Eigenschaften der Kathoden- und der Anodenstrahlen. Sehr schön zeigt sich diese Erscheinung auch, wenn man in die Röhre selbst überhaupt keine Leitung einführt, sondern eine mit sehr verdünntem Gas gefüllte Glasröhre in einiger Entfernung außen mit Stanniolringen umgibt, so daß der außen stattfindende Ausgleich der Elektrizitäten im Inneren der Röhre nur Gegenwirkungen erzeugen kann, in der Art, wie die Kondensatoren (S. 321) auf ihre Belagflächen z. B. bei den bekannten Leidener Flaschen wirken. Auf diese Weise müssen in der Tat oszillierende Entladungen nach beiden Richtungen stattfinden. Es bildet sich dann in der Röhre zwischen den beiden äußeren Ringen ein doppelter Lichtkegel, der in der Hauptsache aus geschichtetem Anodenlicht besteht, sich aber zu beiden Seiten zu dünnen Fäden auszieht, die sich als Kathodenstrahlen herausstellen. Dieser von Fomm 1899 angestellte Versuch erscheint uns sehr wichtig, weil er uns überzeugt, daß das Material der Elektroden bei diesen Strahlungs- und Strömungserscheinungen keinerlei Rolle spielt, daß also nur die Gasteilchen als ihre Träger anzusehen sind. Da die elektrischen Wirkungen, welche die Veranlassung dieser Bewegungen der Gasteilchen sind, die Glaswände durchdringen, die Gasteilchen dies aber nicht tun, so ist der Beweis gegeben, daß es sich hierbei nur um eine sekundäre Erscheinung handeln kann, etwa in dem Sinne, daß die eigentlichen elektrischen Ätherwirbel, welche wir angenommen haben, diese Gasteilchen mit sich fortreißen. Wir werden noch andere Anhaltepunkte hierfür finden.

Daß in einer Hittorfschen Röhre, wie man die Kathodenstrahlen erzeugenden Röhren auch zu nennen pflegt, Strömungen nach beiden Richtungen erfolgen, zeigen auch die schon 1886 von Goldstein entdeckten Kanalstrahlen. Verwendet man als Kathode ein Aluminiumblech, das mit kleinen Löchern versehen ist und den Querschnitt der Röhre ausfüllt, so sieht

man, wenn die Kathodenstrahlen in der einen Richtung von dem Blech ausgehen, durch die Löcher nach der anderen Richtung hin wie durch Kanäle gleichfalls Strahlen austreten, die alle Eigenschaften der Kathodenstrahlen zeigen, nur daß sie positive statt negativer Elektrizität mitführen. Die Richtung dieser Kanalstrahlen weist nicht etwa von der positive Elektrizität führenden Anode hinweg; man kann durch ein geknicktes Rohr die Anode an einen beliebigen Ort verlegen, ohne die Richtung der Kanalstrahlen zu ändern, die nur von der der Kathodenstrahlen abhängt. Eine solche Röhre ist in Figur 8 unserer Farbentafel (S. 389) abgebildet. Einer bloßen Rückstoßwirkung können diese Strahlen aber ihr Entstehen auch nicht verdanken, weil sie sonst dieselbe elektrische Ladung haben müßten. Wir können für ihre Erscheinung bloß die Deutung finden, daß aus der Kathode selbst beide Arten von Elektrizität, nur in verschiedener Menge, austreten, was sich durch den angewendeten Integralstrom erklärt. Die Kanalstrahlen scheinen außer durch ihre positive Ladung auch noch darin mit dem Anodenlicht Ähnlichkeit zu haben, daß sie wahrscheinlich infolge der Rückstoßwirkung der Kathodenstrahlen kleinste Teile des Elektrodenmaterials mit sich führen (Ewers). Diese Mengen sind aber nach einer runden Rechnung so gering, daß erst in etwa 280 Stunden 1 mg Aluminium vom Strom entführt wird.



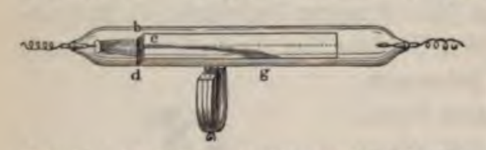
Geißlersche Röhre mit künstlichem Polarlichtbogen.

Die beiden Elektrizitäten unterscheiden sich in allen Formen, in denen sie auftreten, durch ihre verschiedenen chemischen Wirkungen; der positive Strom wirkt oxydierend, d. h. bindet die chemischen Elemente an den Sauerstoff, der negative trennt sie von ihm, was wir schon durch den Voltameterversuch auf S. 385 angedeutet sahen. Dieselben Eigenschaften finden wir an den beiden Strahlenarten wieder: Kathodenstrahlen reduzieren, Anoden- und Kanalstrahlen oxydieren (Wehnelt).

Sehr merkwürdig sind die Einwirkungen eines Magnets auf diese Strahlen. Zunächst zeigt sich wieder eine völlige Verschiedenheit des positiven und des negativen Lichtes. In einer Röhre, deren Verdünnung erst auf dem Grade steht, daß das positive geschichtete Glimmlicht noch fast den ganzen Raum zwischen den Elektroden ausfüllt, verhält sich dieses Licht wie ein elastischer Faden, der zwischen den Elektroden ausgespannt ist und von einem der Röhre von außen genäherten Magnet je nach dem Charakter des zugewendeten Poles angezogen oder abgestoßen wird; es folgt also das ganze Band der Anziehung, soweit es mit den Elektroden in Zusammenhang bleiben kann. Dabei nimmt es unter Umständen eine merkwürdige rotierende Bewegung an, die besonderes Interesse gewinnt. Läßt man in eine Geißlerröhre einen Magnetstab ragen, der durch eine Glashülle isoliert ist, und schickt nun eine Glimmlichtgarbe um ihn herum (die Anordnung des Versuches ist aus der obenstehenden Abbildung zu ersehen), so dreht sich diese Garbe um den Magnet. Die Erscheinung mit ihren Schichtungen, die nun in dem mysteriösen Lichte sich durchkreuzen und winden, bietet eine bedeutungsvolle Ähnlichkeit mit den Strahlen des Polarlichtes, und es ist in der Tat höchstwahrscheinlich, daß dieses gleichen Ursachen seine Entstehung verdankt. Die Atmosphärenschichten,

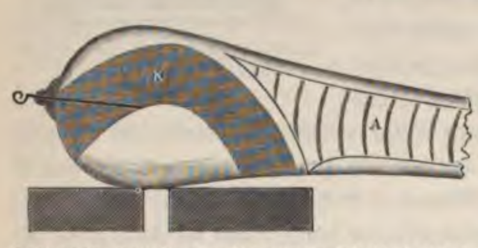
in denen es sich entwickelt, sind luftverdünnt, wie jene Röhren, und müssen elektrische Ladungen mit sich führen, die unter dem Einflusse des großen Erdmagneten stehen. Ein entsprechender Apparat, welcher das Polarlicht in überraschender Weise wiedergibt, ist bereits in den 70er Jahren des 19. Jahrhunderts von de la Rive hergestellt worden.

Auch die Kathodenstrahlen werden vom Magnet beeinflußt, aber in ganz anderer Weise. Zunächst ist wieder ihre völlige Unabhängigkeit von der Anode zu erkennen. Läßt man, wie in der nebenstehenden Zeichnung angegeben ist, durch ein mit einem Spalt versehenes Aluminiumblech bd einen Streifen von Kathodenstrahlen gehen, so wird er von einem Magnet so abgelenkt, als ob er eine elastisch biegsame, nur an der Kathode hängende Lamelle eg wäre, und die Strahlen ordnen sich immer längs einer Fläche, die von den magnetischen Kraftlinien begrenzt ist. Legen wir eine Kathodenröhre auf die einander genäherten Pole eines kräftigen Elektromagnets (s. die untenstehende Abbildung), so bildet das Kathodenlicht K einen die beiden Pole verbindenden Bogen. Das von der anderen Seite kommende Anodenlicht A bleibt in einem ganz bestimmten Abstande von diesem Bogen, und auch seine Schichtungen zeigen sich nicht von jenem Bogen beeinflußt.



Ablenkung der Kathodenstrahlen durch den Magnet.

Unter der Voraussetzung, daß die die Kathodenstrahlen bildenden Teilchen die Übertragung der Elektrizität besorgen, läßt sich aus dem Einflusse der magnetischen Kraft auf diese Teilchen ein Schluß auf das Verhältnis ihrer Ladung e zu ihrer Masse m ziehen. Bei den elektrolytischen Vorgängen in den galvanischen Batterien ist dies Verhältnis $\frac{e}{m}$ überall konstant, wie schon Faraday gezeigt hatte. Dies bedeutet, daß eine elektrische Ladung um so langsamer von der einen zur anderen Seite der Batterie geführt wird, je schwerer der Stoff ist, der sie hinüberträgt. Das war auch von vornherein zu erwarten. Findet nun zwischen den Elektroden etwas ähnliches statt, so muß sich auch hier dies Verhältnis als konstant erweisen. Nach der Geschwindigkeit der Kathodenstrahlenteilchen wird sich aber deren Ablenkbarkeit durch die magnetische Kraft richten, so daß diese für jene ein Maß geben kann. Nachdem Kaufmann jene Unveränderlichkeit von $\frac{e}{m}$ auch für die Erscheinungen in den Hittorfröhren nachgewiesen hatte, wurde 1900 von verschiedenen anderen dieses Verhältnis nochmals gemessen, das zwar nicht die Geschwindigkeit selbst angibt, aber deren Ableitung gestattet. Wichert fand in neuerer Zeit diese Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen gleich einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit, also etwa 100,000 km. So schnell werden vermutlich die Teilchen in den Kathodenstrahlen fortgeschleudert. Sie bewegen sich wesentlich schneller, als bei den elektrolytischen Vorgängen sich das leichteste Element, der Wasserstoff, bewegt, müssen also entweder stärker geladen oder um ebensoviel kleiner sein als ein Wasserstoffmolekül. Jedenfalls aber sind sie noch beträchtlich größer als die Ätheratome, die das Licht tragen, denn sie gehen nicht durch die Glaswände wie diese eigentlichen Träger der Elektrizität.



Kathoden- und Anodenlicht unter Einfluß eines Magnets.

Eine außerordentlich interessante und für unsere Anschauungen wertvolle Beobachtung machte Philips an den Kathodenstrahlen. Er stellte die Elektroden aus Eisen her, so daß sie

stark magnetisch gemacht werden konnten. Schickte man bei einem minimalen Gasdrucke von etwa nur 0,008 mm Quecksilber einen elektrischen Strom durch die Elektroden, schaltete ihn wieder aus und machte gleich darauf die Elektroden magnetisch, so zeigten sich ganz merkwürdige Wirbelerscheinungen in der Röhre. Es entstanden leuchtende, rotierende Ringe, deren Achsen senkrecht zu den magnetischen Kraftlinien stehen. Nach wenigen Sekunden, höchstens nach einer Minute, verschwinden die Ringe, indem sie sich immer langsamer drehen. Sie haben genau dieselbe Lage und Bewegung, wie die elektrischen Ströme, welche den Elektromagnetismus erzeugen. Wir haben sie hier sichtbar vor uns als Nachwirkungen, die uns zugleich beweisen, daß von diesen Strömen die Materie der Kathodenstrahlen mitgerissen wird, und daß diese keineswegs die hauptsächlichen Träger der Elektrizität sind.

Läßt man Kathodenstrahlen durch ein Aluminiumfenster (S. 394) in die freie Luft hinaustreten und in einem sonst dunkeln Raum auf ein negativ geladenes Elektroskop fallen, so entladet sich dieses ebenso, als ob es von ultraviolettem Lichte getroffen würde (S. 382). Die Luft wird von den Kathodenstrahlen leitend gemacht, so daß sie jene Ladung in sich aufnehmen kann. Dies ist eine höchst seltsame Erscheinung, die bei den später zu besprechenden neuen Strahlenarten gleichfalls auftritt und noch der Erklärung harrt. Wir haben schon bei Gelegenheit dieser Wirkung des ultravioletten Lichtes betont, daß sie nur bei negativen Ladungen erscheint, während positive nicht beeinflußt werden. Für die Kathodenstrahlen ist dies um so merkwürdiger, als sie gleichfalls negative Ladungen führen, während wir nur bei einer positiven Ladung des einen Teiles die ausgleichende Wirkung verstehen würden.

Wir sahen die Kathodenstrahlen erst bei einer gewissen Gasverdünnung erscheinen und mit fortschreitender Entleerung der Röhre immer kräftiger werden. Doch ist diese Beziehung keine stetige. Bei sehr hohen Verdünnungen nimmt die Wirkung wieder ab, und unter etwa 0,001 mm Gasdruck hört sie ohne weiteres ganz auf. Man ist heute im stande, die Verdünnung noch etwa hundertfach größer zu machen, so daß schließlich nur noch der 76millionste Teil der ursprünglichen, unter dem Drucke von 1 Atmosphäre stehenden Gasmenge in der Röhre vorhanden ist. Bisher meinte man, daß ein so starkes Vakuum die uns zu Gebote stehenden elektrischen Ströme nicht mehr zu durchdringen vermöchten. Dessenungeachtet durchdringt das Licht diesen fast leeren Raum ungehindert. Ihn erfüllt also Lichtäther, den man deshalb für einen fast vollkommenen Nichtleiter der Elektrizität hielt. Nach unseren bisherigen Anschauungen können wir uns dies nicht vorstellen. Dieser Lichtäther ist ja nach unseren im vorangegangenen Kapitel gesammelten Erfahrungen der eigentliche Träger der Elektrizität. Er könnte also höchstens in dem Sinne Nichtleiter sein, wie etwa ein selbstleuchtender Körper nicht beleuchtet werden kann, oder wie die Atome, die durch ihre Stöße die Schwerkraft verursachen, nicht selbst schwer sein können, wenn nicht etwa eine weitere Stufe von noch kleineren Materieteilen angenommen werden soll, deren Stöße auf jene bisher kleinsten Atome so wirken, wie diese auf sichtbar große Körper. Goldstein zeigte nun, daß, wenn man die Kathode weißglühend macht, die Strahlen wieder von ihr ausgehen, wie stark auch die Gasverdünnung sein mag. Es scheint also, daß die Elektrizität nur einen großen Übergangswiderstand vom Metall zum leeren Raum zu überwinden hat und von den Schwingungen der weißglühenden Kathode hierfür die nötige Kraft entnimmt.

Lenard hat kürzlich (1900) einen Versuch angestellt, der uns zwingt, die Übertragung der Elektrizität nicht, wie bisher ziemlich allgemein angenommen war, in der Hauptsache durch Vermittelung der kleinsten Teile der Gase anzunehmen. Er benutzte dazu eine seiner mit

einem Aluminiumfenster versehenen Röhren, die er bis auf 0,002 mm ausgepumpt hatte. Das ist eine Verdünnung, bei der in der Röhre durch einen elektrischen Strom keine Kathodenstrahlen mehr zu erzeugen sind. Leitete man nun eine gegenüberliegende Elektrode zur Erde ab, so brachen aus der vorher negativ elektrisierten Kathode regelrechte Kathodenstrahlen hervor, deren Ursprung also die Bestrahlung mit ultraviolettem Lichte war. Hier haben jene allerschnellsten Schwingungen des Lichtes, welche wir kennen, elektrische Wirkungen besonderer Art veranlaßt. Die Ätherwellen des Lichtes branden zwischen den Molekülgruppen der bestrahlten Elektrode und setzen sich hier teilweise in Wellen von derjenigen noch unbekannten Länge um, welche die elektrischen Erscheinungen hervorrufen. Dies muß überhaupt bei allen Körpern geschehen, die das Licht trifft, aber in den meisten Fällen werden die geringen Wirkungen verdeckt oder durch Gegenwirkungen aufgehoben. Von allen Lichtarten zeigt das ultraviolette Licht die größte molekulare Energie, was sich z. B. bei seinen chemisch trennenden Wirkungen zu erkennen gibt. Greifen also diese schnellen Ätherbewegungen so energisch in die inneren Bewegungen der Moleküle ein, so können wir es wohl begreifen, daß gerade dieses Licht die deutlichsten elektrischen Wirkungen aufweist. In der freien Luft mag es, von den Körpern zurückstrahlend, auch die schon in ihnen befindliche Elektrizität mit sich wieder fortreißen und in der Luft verteilen. Im sogenannten leeren Raume kommen die Verhältnisse reiner zur Anschauung, denn hier sehen wir die elektrischen Bewegungen der kleinsten Teile wirklich vor uns. Immer deutlicher zeigt es sich, daß die Bewegungen der Elektrizität in dem Lichtäther vor sich gehen müssen, und daß die sichtbaren elektrischen Erscheinungen nur sekundäre Vorgänge sind. Was wir insbesondere an den Kathodenstrahlen sehen oder sonst wahrnehmen, sind in der Tat die geringen, noch in der Röhre verbleibenden Gasmengen, die von den Ätherwirbeln mitgerissen werden. Sie fördern die elektrischen Entladungen durch ihre Bewegung zweifellos wesentlich, und deshalb geht der Strom zunächst leichter durch eine gasverdünnte Röhre, weil die mitwirbelnden und mitübertragenden Teilchen in dieser freiere Bewegung erhalten; dann aber wird mit sehr großer Verdünnung der Widerstand wieder größer, weil eben die Mithilfe des fast gänzlich entfernten Gases immer schwächer wird. Daraus darf aber nicht der Schluß gezogen werden, daß der nur von Lichtäther erfüllte Raum für Elektrizität undurchlässig sei, wie man angenommen hatte.

Auch schon deshalb müssen die Kathodenstrahlen sekundäre Erscheinungen sein, weil sie sich nicht um die Lage der Anode kümmern. Der Ausgleich der Elektrizitäten kann nur zwischen den beiden Elektroden stattfinden und würde unbedingt auf dem direktesten Wege geschehen, wenn ihm nicht die infolge ihrer Ladungen geradlinig fortgeschleuderten Gasteilchen teilweise einen anderen Weg anwiesen. Spätere Untersuchungen müssen unserer Ansicht nach lehren, daß der Hauptausgleich der Elektrizitäten auf geradestem Wege zwischen den Elektroden, selbst unbekümmert um die Glaswände der Röhre, also unter Umständen auch außerhalb derselben, stattfindet, soweit es die vorliegenden Verhältnisse gestatten.

b) Röntgenstrahlen.

Als im Jahr 1895 Röntgen (sein Bildnis s. S. 399) in Würzburg Versuche mit Kathodenstrahlen anstellte, sah er, wie ein zufällig in der Nähe befindlicher, mit Bariumplatincyanür bestrichener Schirm von der Art, wie man sie zur Sichtbarmachung von ultravioletten Strahlen verwendet, in dem sonst dunkeln Raum aufleuchtete, als ob er von solchem ultravioletten Lichte getroffen würde. Die Ursache dieses Aufleuchtens war zweifellos die Hittorfsche Röhre. Diese

war aber nicht etwa mit einem Aluminiumfenster versehen, aus dem die im Inneren befindlichen Kathodenstrahlen in die freie Luft bis zu dem Schirme hätten dringen können. Die Wirkung ging offenbar von der grünlich fluoreszierenden Stelle der Röhrenwand aus, die der Kathode gegenüberliegt, also der Antikathode. Sollte dieses Licht selbst so kräftig auf den Schirm wirken? Man umhüllte die Röhre mit einem schwarzen Tuch, durch welches für das Auge kein Lichtstrahl dringen konnte. Der Schirm leuchtete nach wie vor. Man stellte eine dicke Holzplatte zwischen Schirm und Röhre: dieselbe Wirkung trat ein. Man legte die Hand auf die eine Seite des Schirmes, da zeigte sich auf der anderen das eigentliche Wunder der neuentdeckten Strahlengattung: es entstand ein Schattenbild, nicht der Hand selbst, sondern hauptsächlich nur ihrer Knochen; das Skelett bildete sich ab, während die Fleischteile nur zart angedeutet waren. Für die Röntgenstrahlen, wie man sie fortan nannte, war also durchsichtig, was für alles andere Licht undurchdringlich war. Eine unsichtbare und auch sonst ganz unmerkliche Wirkung wurde kräftiger als das stärkste Licht, sobald man sie durch jenen empfindlichen Schirm für unser Auge sichtbar machte. So erschloß sich uns nicht nur ein Geheimnis der Natur außer uns, sondern auch die Tiefen des eigenen lebenden Körpers, in die noch keines Menschen Auge vorher gedrungen war, wurden vor uns sichtbar aufgetan. Nicht nur sah man das eigene Gerippe wie greifbar vor uns, fast als müsse man an einen übernatürlichen Einfluß glauben, man sah auch unser Herz, in dem von Rippen gepanzerten Brustkorbe hängend, seine rhythmische Bewegungen ausführen, die uns in jeder Sekunde neu das Leben schenken. War es nicht begreiflich, daß diese Erscheinung sofort alle Gemüter bewegte, und daß keine andere Entdeckung, wieviel wertvoller sie auch für den Fortschritt unserer Naturerkenntnis gewesen sein mag, so schnell und so allgemein populär geworden ist, wie diese von dem Würzburger Professor zufällig aufgefundene Eigenschaft oder Folgeerscheinung einer elektrischen Entladung, die sonst, z. B. in den Kathodenstrahlen, dem denkenden Forscher kaum geringere Rätsel und Wunder vorlegt?

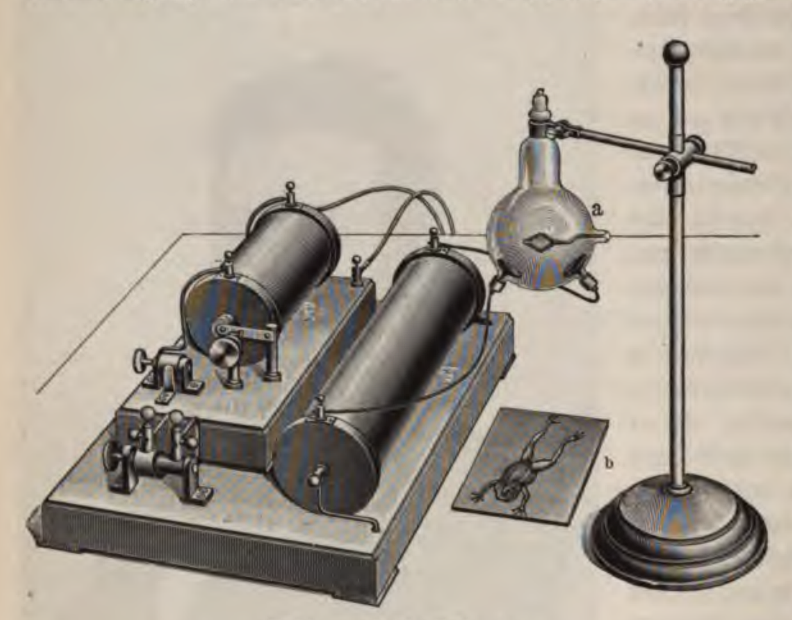


Wilhelm Konrad Röntgen. Nach Photographie.

Wie reihen wir die Röntgenstrahlen in unser Bild von den Naturerscheinungen ein? Zur Beantwortung dieser Frage müssen wir ihre besonderen Eigenschaften näher kennen lernen. Da diese Strahlen dieselben Stoffe zum Fluoreszieren bringen wie das ultraviolette Licht, so war es natürlich, zunächst auf den Gedanken zu kommen, sie möchten aus solchem kurzwelligen Licht bestehen, das ja auch für unser Auge unsichtbar ist. Diese Erklärung mußte man aber

sofort fallen lassen, denn ultraviolettes Licht hat die Haupteigenschaft der Röntgenstrahlen nicht, die der Durchdringlichkeit; es wird sogar leichter absorbiert als gewöhnliches Licht, ganz besonders von Glas, wie wir schon S. 247 bemerkten. Die Röntgenstrahlen aber gehen selbst durch Metallplatten, die das Licht vollständig zurückwerfen.

Dagegen teilen sie mit dem ultravioletten Lichte neben ihren fluoreszierenden Wirkungen die photochemischen Eigenschaften. Man kann photographische Röntgenbilder, sogenannte Radiographien, herstellen. Dazu benutzt man selbstverständlich keinen photographischen Apparat, da es sich ja hier nur um Schattenbilder handelt. In den ersten Stadien der Anwendung legte man die durch Einwickeln in schwarzem Papier gegen die Einwirkungen des gewöhnlichen Lichtes geschützte, lichtempfindliche Platte b in ganz geringer Entfernung unter die Antikathode der Hittorfröhre a und den zu radiographierenden Gegenstand, z. B. einen Frosch (s. die nebenstehende Abbildung), direkt auf die Platte. Man brauchte in der ersten Zeit etwa fünf Minuten, um auf diese Weise ein Bild der Skeletteile der Hand auf der Platte zu erzeugen. Seitdem ist es gelungen, die Expositionszeiten wesentlich zu verkürzen. Auf einige Einzelheiten der modernen Technik der Radiographie kommen wir später zurück.



Radiographische Aufnahme.

Durch ihre ungemein große Durchdringungskraft unterscheiden sich die Röntgenstrahlen auch sehr wesentlich von den Kathodenstrahlen, die ihrer Erzeugung vorausgehen müssen, denn diese können die Glaswand der Röhre nicht durchdringen, jene aber gehen leicht hindurch. Es lag also zuerst die Vermutung nahe, daß die Röntgenstrahlen bereits in der Röhre unter die Kathodenstrahlen gemischt sind, da wir manche Anhaltspunkte dafür haben, daß die letzteren aus einer ganzen Anzahl von verschiedenen Strahlengattungen bestehen. Der Stoff, welcher die Röntgenstrahlen trägt, wäre nur viel feiner als der die Kathodenstrahlen bildende und könnte die Glaswand der Röhre durchdringen. Es wäre nach dieser „Durchsiebung" dann durchaus erklärlich, wenn die Röntgenstrahlen sich auch noch in anderen Punkten von den Kathodenstrahlen unterscheiden würden. So ist es unter dieser Voraussetzung selbstverständlich, daß die Röntgenstrahlen nicht oder nur sehr wenig reflektiert werden, während dies bei den Kathodenstrahlen in weit höherem Maße der Fall ist. Durchlässigkeit und Reflexion heben einander auf, denn je mehr Partikelchen durchschlüpfen, desto weniger können

zurückgeworfen werden. Die Durchlässigkeit bedingt auch, daß keine merkliche Brechung der Strahlen stattfindet, die ja die Folge eines Widerstands bei der Durchdringung ist. Man kann also die Röntgenstrahlen nicht in einem Brennpunkte vereinigen wie die Kathodenstrahlen und folglich auch kein vergrößertes oder verkleinertes Röntgenbild direkt erzeugen.



Röntgenröhre mit Platinhohlspiegel im Brennpunkt der Kathodenstrahlen. Vgl. Text, S. 405.

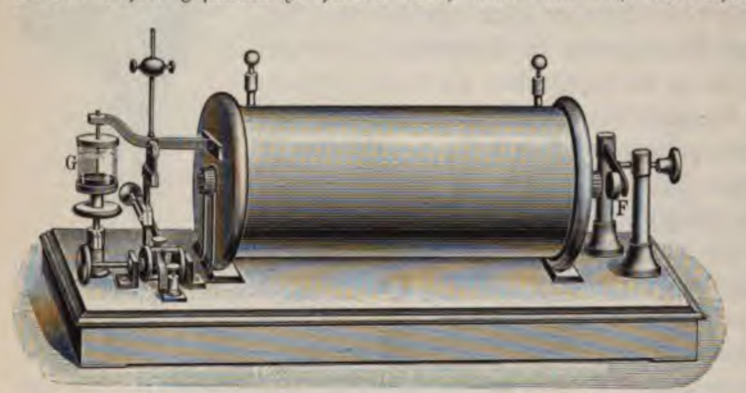
Es fehlen den Röntgenstrahlen jedenfalls wesentliche Eigenschaften des Lichtes, und es mußte deshalb zunächst zweifelhaft bleiben, ob man es bei ihnen überhaupt mit einer Wellenbewegung zu tun hat, die nach unseren bisherigen Erfahrungen allen physikalischen Vorgängen, mit Ausnahme der Erscheinungen der Schwerkraft, zu Grunde liegt. Wir können uns z. B. die Röntgenstrahlen als einen Hagel von Ätheratomen vorstellen, die geradlinig von der Antikathode ausgehen und, wie die zu Lichtwellen geordneten Ätheratome, in ihrer Lage zueinander keine Beziehungen haben, also etwa ein wellenloses Licht bilden. Dadurch würden diese Strahlen mit den Ätherströmen Ähnlichkeit gewinnen, durch welche wir uns die Wirkungen der Schwerkraft hervorgerufen denken. Auf der anderen Seite enthalten aber die bisher gemachten Erfahrungen an den Röntgenstrahlen nichts, was unbedingt gegen ihre Wellennatur spricht. Wenn wir von lauter Stoffen umgeben wären, welche so durchgängig für das Licht sind wie verdünnte Gase, so würden wir auch von seinem Brechungs- und Reflexionsvermögen oder von anderen Eigenschaften einer Wellenbewegung nichts erkennen. Die große Durchdringungskraft der neuen Strahlen stellt der Untersuchung nur praktische Schwierigkeiten entgegen. Es war deshalb die Erwartung durchaus berechtigt, trotz des mangelnden Brechungs- und Reflexionsvermögens an den Röntgenstrahlen Beugungserscheinungen wahrnehmen zu können, die ja auch beim Lichte zur genauen Bestimmung seiner Wellenlängen geführt haben. Nun ist es in der Tat gelungen (Haga und Wind), Beugungserscheinungen an diesen Strahlen zu beobachten. Der Versuch wurde im Prinzip ebenso durchgeführt, wie er für das Licht auf S. 271 beschrieben ist. Es wurden Spalte, in Platinblech eingeritzt, von nur 0,001 mm Breite benutzt und Belichtungszeiten bis zu 200 Stunden angewendet, worauf sich mikroskopisch feine Rippchen auf der photographischen Platte zeigten, deren Breite auf Wellenlängen von 270 Millionstel bis 200 Tausendmillionstel Millimeter schließen lassen; das sind Wellen, die rund 3000mal kleiner sind als die des gelben Lichtes und noch etwa tausendmal kleiner als die kleinsten bisher beobachteten Wellen ultravioletter Strahlen. Bald nach der Entdeckung dieser Strahlen wurde schon von J. J. Thomson gezeigt, daß sich alle ihre Eigenschaften unter der Annahme erklären lassen, ihre Wellenlänge sei mindestens 15mal kleiner als die der äußersten ultravioletten Strahlen. Sollten nun die oben angeführten äußerst feinen Beobachtungen auch wirklich auf einer Täuschung beruhen, so ist doch durch jene zum mindesten bewiesen, daß die Röntgenstrahlen, wenn sie überhaupt eine Wellenbewegung sind, nur außerordentlich kleine Wellen haben können.



Regulierbare Röntgenröhre. Vgl. Text, S. 405.

Dies würde zunächst insofern im Widerspruche mit den optischen Gesetzen stehen, als die kleineren Wellen auch die brechbareren sind, während die Röntgenstrahlen gar nicht gebrochen werden. Wir können den Widerspruch lösen, indem wir entweder ihre Wellennatur

überhaupt bezweifeln, oder, indem wir uns die Schwingungszahl dieser sehr kleinen Wellen vermindert denken, wodurch der ihrer Bewegung entgegenstehende Widerstand gleichfalls verkleinert wird. Die Schwingungszahl ist nur durch die Annahme einer geringeren Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu verkleinern (S. 240). In der Tat scheint es, als ob diese erheblich geringer sei als die des Lichtes, wenn auch bedeutend größer als die der Kathodenstrahlen, denn man glaubt Geschwindigkeiten bis zu 100,000 km in der Sekunde oder dreimal weniger als die des Lichtes gefunden zu haben. Doch leiden alle diese Beobachtungen noch an manchen Fehlerquellen, so daß ein abschließendes Urteil über diese Frage von der Wellennatur der Röntgenstrahlen wahrscheinlich noch lange auf sich warten lassen wird. Wir können jedenfalls angesichts der oben angeführten Erfahrungen über ihre sehr geringe Größe ihre etwaige Wirkung ganz aus dem Spiele lassen.



Kleines Funkeninduktorium mit Quecksilberwippe und Wagnerschem Hammer. Vgl. Text, S. 405.

Es ist nun noch weiter von fehlenden Eigenschaften dieser sonderbaren Strahlen zu berichten, denn wir haben es hier wirklich mit einem fast absoluten Nichts zu tun, das dennoch eine der wunderbarsten Wirkungen übt und beweist, daß da, wo unser Materiebegriff aufzuhören scheint, wir doch noch lange nicht an den unteren Grenzen der Natur angelangt sind.

Die Röntgenstrahlen sind nicht mit Elektrizität geladen wie die Kathodenstrahlen (Curie und Sagnac). Daher werden sie auch nicht vom Magnet abgelenkt, und nichts behindert ihren geraden Weg. Um aber überall widerspruchsvoll und wunderbar zu sein, erzeugen diese unelektrischen Strahlen ihrerseits Elektrizität in Leitern, die sie treffen, sind also in dieser Beziehung dem ultravioletten Licht ähnlich (S. 382). Während indes dieses nur negative Ladungen entführt oder in Kathodenstrahlen verwandelt, können Röntgenstrahlen je nach dem Stoff, auf den sie wirken, beide Elektrizitäten aus ihm hervorlocken. Winckelmann machte folgendes Experiment: er stellte eine Kupfer- und eine Aluminiumplatte einander in einem gegen Licht und äußere Luft abgeschlossenen Kasten gegenüber. Dieser hatte ein Aluminiumfenster, durch das Röntgenstrahlen auf die innen befindliche Aluminiumplatte fallen konnten. Verband man dann die beiden Platten durch eine Leitung über ein Galvanometer hinweg, so zeigte sich, solange die Aluminiumplatte von jenen Strahlen getroffen wurde, jedesmal ein Strom, der eine Spannung von 0,5 Volt hatte, d. h. nur ungefähr dreimal weniger, als ein gewöhnliches Daniell-Element gibt. Wir haben hier vielleicht einen ganz ähnlichen Prozeß vor uns, wie die von Lenard gezeigte Bildung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht (S. 398). Die Luft wird elektrolytisch leitend.

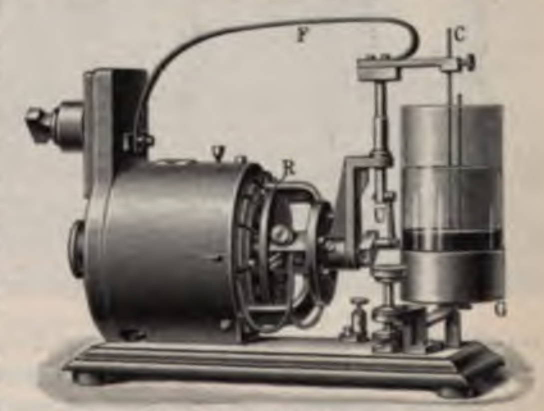
Aus diesem Grund entladen die Röntgenstrahlen ebenso wie die Kathodenstrahlen und das ultraviolette Licht mit Elektrizität behaftete Konduktoren, weil die umgebende Luft sie nicht mehr isoliert. Während aber ultraviolettes Licht und Kathodenstrahlen nur auf negative

Ladungen in diesem Sinne wirken, entladen Röntgenstrahlen beide Arten von Elektrizität. Dies hängt offenbar mit ihrem eigenen nicht geladenen Zustande zusammen. Denn während negativ geladene Teilchen negative Elektrizität von einem Körper abstoßen, positiv geladene Teilchen aber festhalten, können ungeladene Teilchen durch ihren Anprall beide Elektrizitäten freimachen und mit sich fortführen.

In ganz entsprechender Weise wirken auch die angeführten Strahlenarten auf die Funkenstrecke in freier Luft. Man pflegt hohe Stromspannungen durch die Länge der Funken zu bemessen, welche in freier Luft zwischen Spitzen überspringen, die man so weit voneinander entfernt, bis die Funkenentladungen aufhören. Durch die Bestrahlung der negativen Elektrode mit ultraviolettem Licht nimmt die Entladung eine andere Form an. Bei Induktionsströmen z. B. wird Büschelentladung in Funken verwandelt (Hertz), und bei Bestrahlung der positiven Elektrode bleibt ultraviolettes Licht wirkungslos. Röntgenstrahlen aber wirken auf beiden Seiten.

Daß diese Strahlen andere, an sich unsichtbare Gegenstände, auf die sie fallen, leuchtend machen können, haben wir schon an jener Schirmwirkung gesehen, durch welche sie sich zuerst verrieten. In ähnlicher Weise wie auf das Platincyanür wirken sie auch auf verschiedene andere Salze, namentlich auf Flußspat, der infolgedessen zur Verstärkung der photographischen Wirkung verwendet wird. Steinsalz leuchtet nach energischer Bestrahlung mit Röntgenlicht sogar noch eine Weile nach (Keilhack).

Im Zusammenhange hiermit steht wahrscheinlich eine andere wunderbare, von Sagnac 1898 entdeckte Eigenschaft dieser Strahlen. Läßt man Röntgenstrahlen einige Zeit lang auf eine Metallplatte fallen, so übertragen sie in geringem Maß ihre Eigenschaften auf diese: die Platte sendet ihrerseits Strahlen aus, wie vorher die Antikathode. Man hat diese Strahlen zur Unterscheidung **Sekundärstrahlen** genannt. Offenbar haben die Röntgenstrahlen einen starken und nachhaltigen Einfluß auf die molekularen Bewegungen der Stoffe, auf welche sie treffen, denn sie rufen sogar ein deutliches Nachtönen in ihnen hervor.

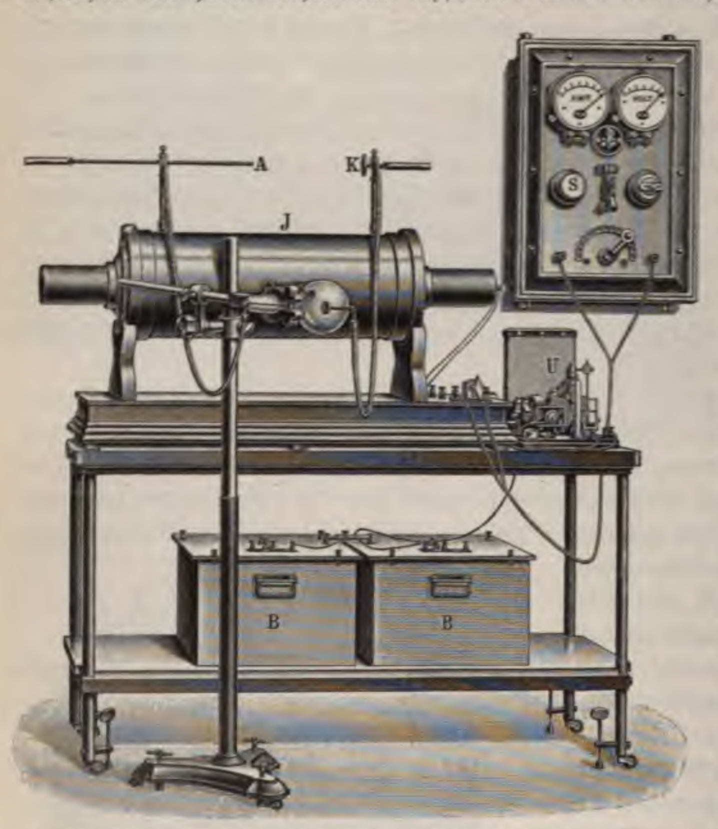


Motorquecksilberunterbrecher. Vgl. Text, S. 406.

Auch auf das **Selen** wirken die Röntgenstrahlen (Perreau). Ein Selenpräparat, das im Dunkeln einen Widerstand von 40,000 Ohm zeigte, verringerte denselben bei Bestrahlung mit Tageslicht auf 33,000, dagegen mit Röntgenlicht bei einem Abstand der Röhre von 0,5 cm auf 34,000 Ohm.

Fassen wir alle bisher gemachten Erfahrungen **zusammen**, so können wir uns folgendes, wenn auch noch nicht ganz klares Bild von der Natur der Röntgenstrahlen machen. In der Hittorfröhre werden von den elektrischen Wirbeln der Ätheratome, die nach unserer Grundanschauung die Träger aller Fernwirkung sein müssen, die vorhandenen Gasteilchen mitgerissen, und zwar um so schneller, je kleiner diese sind. Durch die wirbelnden Bewegungen fallen die Moleküle teilweise auseinander, und es entstehen so viele Strahlengattungen, als Teilungen von verschiedener Größe in den vorhandenen Molekülen stattfinden. Durch die Berührung mit der Kathode nehmen sie negative Ladungen an, d. h. sie erregen um sich sekundäre elektrische Wirbel.

Durch diese werden sie in gerader Richtung von der Kathode weggetrieben und bilden die Kathodenstrahlen, soweit sie zu groß sind, um durch die molekularen Poren des Glases hindurchzudringen. Nur die allerkleinsten Teilchen, vielleicht die Massenatome selbst, die wir uns indes immer noch viel größer denken als die die Kraftwirkungen direkt übertragenden Ätheratome, treten durch das Glas in die freie Luft hinaus, wobei sie ihre Elektrizität an das Glas abgeben. Diese kleinsten Teile bewegen sich mit viel größerer Geschwindigkeit als die Kathodenstrahlen und haben deshalb aus doppelten Gründen weit mehr Durchdringungskraft als jene. Stoßen sie dabei auf Massenmoleküle, so können sie dieselben chemisch spalten, photographische Eindrücke hervorrufen oder den Äther zwischen ihnen in Schwingungen versetzen, die sich je nach ihrer Art als Luminiszenz oder als elektrische Wirkungen kundgeben. Da diese strahlenförmig ausgeschleuderten Teilchen keine oder doch nur eine Wellenbewegung haben, die weit unter der Grenze der Empfindlichkeit unserer Sehzapfen liegt, so müssen diese Strahlen für uns unsichtbar bleiben. Wenn man sehr intensive Röntgenstrahlen dennoch in der Luft leuchten sah, so ist dies offenbar nur eine Folgeerscheinung, wie die angeführte Luminiszenz des Steinsalzes, denn erst die gegenseitigen Stöße bringen die Lichtschwingungen hervor. Ebenso entsteht das Glimmlicht und das schwache Licht der Kathodenstrahlen.



Röntgeneinrichtung mit Akkumulatorenbetrieb. Vgl. Text, S. 406.

Bei der Wichtigkeit der Anwendung von Röntgenstrahlen, namentlich für wissenschaftlich-anatomische und für chirurgische Zwecke, hat man in den letzten Jahren die zu ihrer Erzeugung nötigen Apparate sehr wesentlich zu vervollkommnen gewußt. Zunächst hatte man sich bemüht, den Röhren eine möglichst praktische und haltbare Form zu geben. Wir haben gesehen, daß die Röntgenstrahlen nur bei Gasdruck in bestimmten Grenzen entstehen. Solange der Druck noch zu hoch ist, entwickeln sich keine genügend kräftigen Kathodenstrahlen in der Röhre; wird aber der Druck zu gering, so hört die Überführung der Elektrizität zwischen den Elektroden überhaupt auf. Während des Gebrauches ändert sich nun der Druck in der Röhre, und dies kann unter verschiedenen Umständen in verschiedener Richtung geschehen. An

den Glaswänden bleibt, wie an allen festen Gegenständen, immer eine Luftschicht haften, von der ein Teil durch die starke Erwärmung der Röhre beim Aufprallen der Kathodenstrahlen losgelöst wird, wodurch der Gasdruck sich steigert, während Partikelchen vom losgerissenen Elektrodenmaterial Luft absorbieren. Man hatte also zunächst dafür zu sorgen, daß die Glaswände sich nicht so stark erhitzen. Dies erreichte man dadurch, daß man die Antikathode überhaupt nicht mehr auf der Glaswand entstehen ließ, sondern mitten in der Röhre im Brennpunkte der von der hohlspiegelförmigen Kathode herkommenden Strahlen einen anderen Hohlspiegel von Platin H aufhing und mit der gewöhnlichen Anode A verband (s. die obere Abbildung, S. 401). Die Röntgenstrahlen entstehen nun auf dem Platinspiegel, aber wesentlich stärker als bei der ersten Anordnung, und die Röhre wird nicht mehr warm. Eine solche Röhre wird mit der Zeit gasärmer, sie arbeitet, wie man sagt, immer härter, kontrastreicher, solange überhaupt noch Strahlen durchdringen. Doch läßt sich durch Erwärmung der Gasdruck wieder erhöhen.



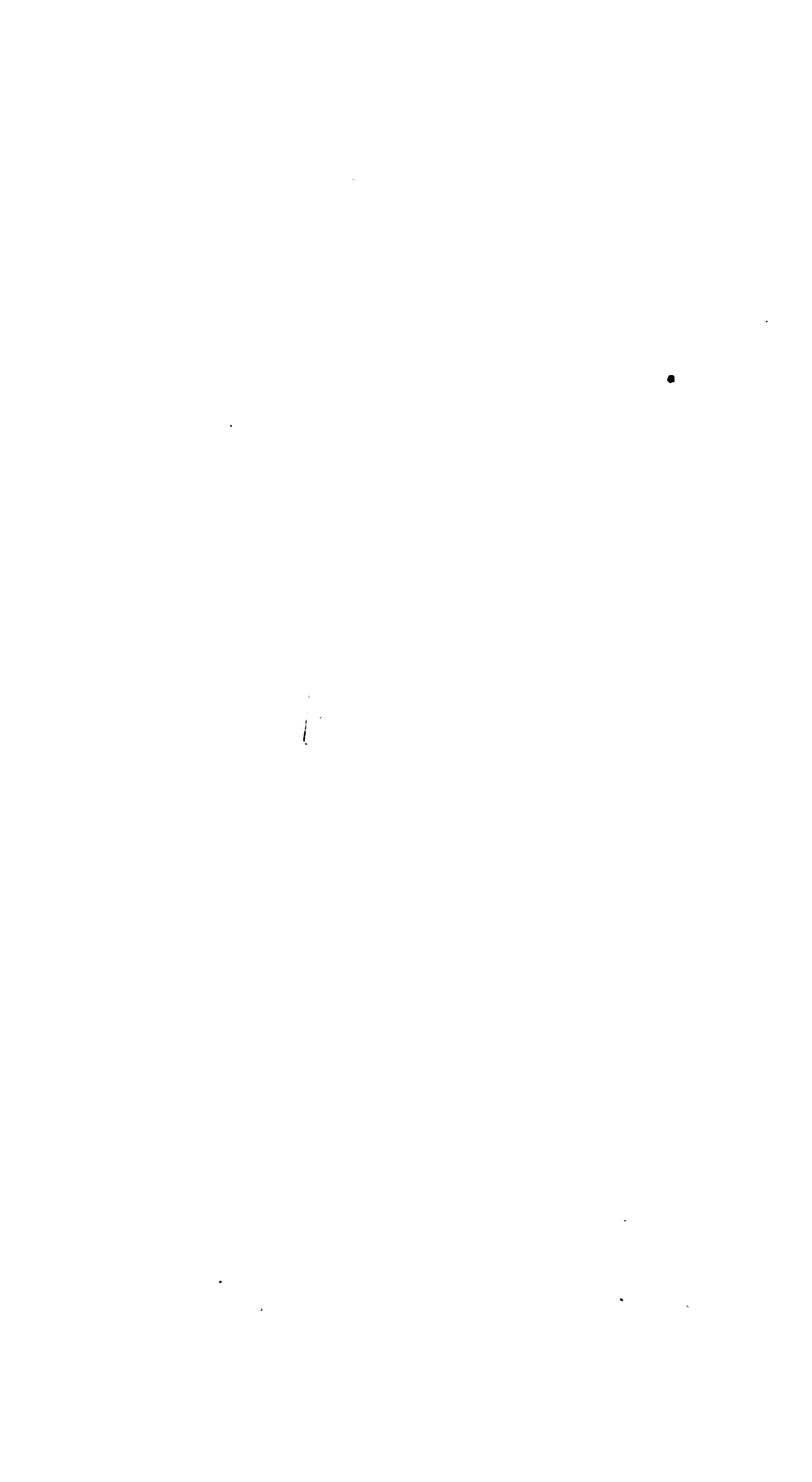
Durchleuchtung mit Röntgenstrahlen. Vgl. Text, S. 406.

Solche Röntgenröhren sind von Hirschmann in Berlin in den Handel gebracht. Siemens und Halske haben eine sogenannte regulierbare Röntgenröhre konstruiert, die in einem Seitenrohre r Phosphor enthält (s. die untere Abbildung, S. 401). Dieser hat die Eigenschaft, Luft bei Erwärmung stark zu absorbieren. Ist der Gasdruck zu groß, so läßt man den Strom über den Phosphor gehen, bis die gewünschte Verdünnung konstatiert wird; bei zu geringem Drucke hilft wieder Erwärmung ab. Wichtig war es auch, die Induktorien zu verbessern und namentlich die Zahl der Unterbrechungen des primären Stromes soviel als möglich zu erhöhen (S. 361). Einen wesentlichen Fortschritt brachte in dieser Beziehung die Quecksilberwippe G (s. die Abbildung, S. 402), die ebenso wie der Wagnersche Hammer F früher durch einen Elektromagneten, in neuerer Zeit aber durch einen besonderen kleinen Elektromotor R

mittels einer Kurbel U und Feder F bewegt wird (s. die Abbildung, S. 403). Bei diesem Apparat taucht eine Nadel C in einem Gefäße mit Quecksilber G abwechselnd auf und nieder, wodurch sie den Strom schließt und unterbricht. Über dem Quecksilber befindet sich eine Schicht Petroleum oder Spiritus, um das Spritzen des ersteren zu vermeiden. Durch solche Vorrichtungen wird der Strom bis zu 30mal in der Sekunde unterbrochen, und die mit den besten Induktorien erreichten Spannungen gehen bis zu 300,000 Volt.

Eine vollständige Röntgeneinrichtung, wie man sie heute fertig erhalten kann und für ärztliche Durchleuchtungen anzuwenden pflegt, zeigt die Abbildung S. 404. Als Stromquelle dienen die Akkumulatoren BB. Von ihnen geht der Strom zunächst nach dem Schaltbrett S, an welchem sich ein Ampère- und ein Voltmesser befinden, an denen Stärke und Spannung des primären Stromes beobachtet werden. Dieser wird dann in die primäre Spule des Induktoriums J geleitet, nachdem er durch den Unterbrecher U gegangen ist. Die beiden aus der Induktionsspule tretenden Drähte stehen einerseits mit dem Funkenzieher AK, durch welchen man die Kraft des Induktionsstromes abmißt, anderseits mit der an ein Stativ geschraubten Röntgenröhre in Verbindung. Die beiden Abbildungen, S. 405 und 407, zeigen, wie man sich einer solchen Vorrichtung bedient. Auf der ersten (S. 405) ist eine Durchleuchtung des Brustkorbes dargestellt. Die Strahlen durchdringen den Oberkörper von der Rückseite her, und mit Hilfe des fluoreszierenden Schirmes, dessen empfindliche Seite dem Beobachter zugekehrt ist, dringt das Auge in das verborgene Innere des lebenden Körpers. Auf der zweiten Abbildung (S. 407) sieht man die Anordnung für eine photographische Aufnahme, bei welcher der zu Behandelnde sich nicht einmal völlig zu entkleiden braucht. Nur Metallknöpfe an der Kleidung muß man vermeiden, die einen störenden Schatten werfen; von dem leinenen Hemd aber zeichnet sich keine Spur auf der Platte ab, die in der verschlossenen Holzkasette C während der Belichtung bleibt, so daß die Aufnahme bei vollem Tageslicht geschehen kann. Auf die empfindliche Schicht der Platte pflegt man vorher einen sogenannten Verstärkungsschirm zu legen, für welchen ein mit wolframsauerm Calcium bestrichenes Kartonblatt dient. Dieses Salz fluoresziert sehr stark unter der Wirkung der Röntgenstrahlen, so daß sein Licht direkt auf der empfindlichen Schicht der Platte entsteht und die chemische Zersetzung hervorbringt. Mittels aller dieser Verbesserungen ist es Donath gelungen, schon in zwei Sekunden ein Röntgenbild vom Schultergelenk und Brustkorb zu erhalten, wozu man im ersten Jahre nach der Entdeckung noch nahezu eine Stunde brauchte. Der Brustkorb gilt als eines der schwierigsten Röntgenobjekte, bei leichteren, z. B. der Abbildung eines Handskelettes, kann man heute schon beinahe von Momentaufnahmen reden.

Über die Anwendungen der Radiographie in der Heilkunde hat Ernst von Bergmann auf der Naturforscherversammlung zu München im Jahre 1899 einen lichtvollen Vortrag gehalten. Er führte zunächst aus, daß die sensationelle Wirkung, welche die wunderbare Entdeckung allgemein hervorrief, zu allzu großen Hoffnungen für die Verwendbarkeit der Röntgenstrahlen verleitet habe, und daß es jetzt an der Zeit sei, vor solchen Übertreibungen zu warnen. Über die Wirkung dieser Strahlen auf Bakterien sind widersprechende Resultate zu Tage gefördert worden, und die Wirkungen auf die Haut beschränken sich auf solche, die durch gewöhnliche Licht- und Wärmequellen auch hervorzubringen sind. „Die Bedeutung der Röntgenstrahlen für die Medizin ist deshalb so groß und hoch, weil sie in nichts anderem besteht, als in der Vermehrung unseres anatomischen und unseres pathologisch-anatomischen Wissens. Seit wir gelernt haben, mit Röntgenstrahlen zu untersuchen, ist die Lehre von den Fremdkörpern





1. Hand eines $2^1/_2$ jährigen Kindes mit unvollkommener Ausbildung der Knochen.



2. Zauclus cornutus, ein Südseefisch.



5. Bruch des rechten Unterarms mit Verlagerung der Bruchstücke.



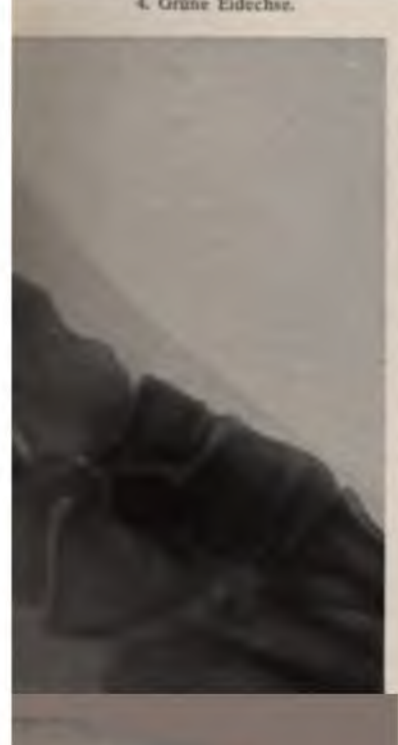
6. Im



3. Chamäleon (Chamaeleo cristatus).



4. Grüne Eidechse.



...heilte Pistolenkugel.



7. Frauenhand.

...er.

in der Chirurgie von Grund aus umgestaltet und die Lehre von den Knochenbrüchen in wichtiger und wesentlicher Weise erweitert worden."

Wir geben auf der hier beigehefteten Tafel eine Anzahl von Röntgenbildern wieder. Figur 1 und 2 zeigen die Hand eines 2½jährigen Kindes und einer erwachsenen Frau. Man sieht aus der Vergleichung, wie die Knochen der kleinen Hand noch wenig ausgebildet sind und große Lücken zwischen sich lassen, wo das weitere Wachstum der Knochen erfolgt. Durch die neue Methode kann man das Wachsen des Knochens im lebenden Körper verfolgen und z. B. rachitisch-krankhafte Zustände in ihren ersten Stadien wahrnehmen und behandeln, wo der äußere Habitus des Kindes noch nichts davon verrät. Man erkennt die Ursache krankhafter Verbildungen der Gliedmaßen, man sieht innere Knochenbrüche, mit denen das Kind auf die Welt kommt, oder die Verlagerung von Knochenbruchstücken (Fig. 3), die namentlich durch die Vergleichung mit der normalen Zusammenstellung für den Laien deutlich hervortritt. In dem Röntgenbilde



Röntgenographische Aufnahme mittels Röntgenstrahlen. Vgl. Text, S. 466.

eines Fußes (Fig. 4) ist eine Pistolenkugel zu erkennen, die sich völlig unschädlich für die Funktionen dieses Gliedes zwischen die Knochen eingelagert hat. Bergmanns konstatierte wiederholt solche Kugeln, selbst in edlen Körperteilen, z. B. eine solche, die ein Krieger von 1870 seit 29 Jahren in seiner Lunge trägt, ohne es vor der Röntgenaufnahme überhaupt gewußt zu haben, da er immer geglaubt hatte, die Kugel wäre damals von einer Rippe abgeprallt. Selbst im Gehirne sind, wie die Röntgenstrahlen erwiesen haben, Kugeln unschädlich verblieben, und diese Wahrnehmungen haben in neuerer Zeit manchen gefahrvollen Eingriff zur Beseitigung eines Fremdkörpers verhütet.

Auch auf dem Gebiete der Zoologie hat die Radiographie oft eine hilfreiche Hand geboten, indem sie den Skelettbau von selteneren Objekten aufdeckte, die man deswegen nicht gern ihrer

Weichteile berauben wollte, oder wenn es sich um kleine Tiere handelte, bei denen eine so klare Darstellung, wie sie das Röntgenbild gibt, durch eine vollständige Herausschälung des Knochengerüstes gar nicht möglich wäre. Einige solcher Objekte geben wir in Fig. 2, 3 und 4 der Tafel wieder.


Kryptoskop.

Endlich mag noch erwähnt werden, daß auch auf gewissen Industriegebieten die Röntgenstrahlen eine Anwendung zu finden beginnen. Man erkennt durch sie oft leicht Gußfehler, da sich Blasen im Inneren von Gußstücken schon durch den bloßen Anblick mit dem „Kryptoskop" (s. die nebenstehende Abbildung) verraten, einem einfachen Guckkasten, der vorn mit dem fluoreszierenden Schirme versehen ist. Auch versteckte Brüche oder Lötstellen lassen sich derart nachweisen, unechte Diamanten sind von echten zu unterscheiden, und andere Dinge mehr. Aber alle diese Anwendungen haben noch wenig Verbreitung gefunden. Es scheint demnach, als ob die wunderbare Kraft der Röntgenstrahlen auf ein weit engeres Arbeitsgebiet beschränkt bleiben sollte, als man bei ihrer Entdeckung vermutet hatte, die der Phantasie den weitesten Spielraum bot.

c) Becquerelstrahlen.

Im Jahre 1897, kaum zwei Jahre nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen, teilte der französische Physiker Henry Becquerel, dessen Vater und Großvater gleichfalls hervorragende Physiker waren (namentlich war sein Vater eine erste Autorität auf dem Gebiete der Phosphoreszenz-Erscheinungen, die uns hier besonders interessieren werden), eine neue Entdeckung mit, die zuerst allgemein auf Unglauben stieß. Sie war in der Tat so seltsam, daß der Entdecker selbst fast ein Jahr nicht daran glauben wollte. Er hatte seine erste darauf bezügliche Wahrnehmung schon ein ganzes Jahr vor der Veröffentlichung gemacht, ehe er sich damit herauswagte, denn sie schien den obersten Satz aller physikalischen Erkenntnis, den von der Erhaltung der Kraft, umwerfen zu wollen. Die Erscheinung war jedenfalls für den Naturkundigen noch viel rätselhafter als die der Röntgenstrahlen, für die man die mächtige Kraftquelle der Elektrizität ja wirken sah, um ihre durchdringende Kraft herzustellen.


Radiographie einer Medaille.

Die neue Strahlengattung ging von ganz geringfügigen Mengen eines bekannten Stoffes aus, einer Uranverbindung, ohne daß es einer äußeren Anregung dazu bedurfte, oder daß sich die Wirkung, solange man sie beobachtete, an demselben Präparat irgendwie merklich vermindert hätte. Die Wirkung selbst ist denen der Röntgenstrahlen, anderseits der Kathodenstrahlen ähnlich. Verschließt man ein solches Uranpräparat in ein Bleikästchen und stellt dieses auf eine photographische Platte, die man vor anderem Lichte durch Umhüllung mit schwarzem Papier geschützt hat, so zeichnet sich das Kästchen auf der Platte ab, erzeugt also gewissermaßen ein Röntgenbild aus einer unbekannten Strahlungskraft heraus, die in dem Stoffe verborgen liegt und sich nicht vermindert. Die hierneben abgebildete Kopie einer Medaille ist eins der ersten Bilder, welche auf diese Weise von Becquerel hergestellt wurden, und zwar wurde das Original aus Aluminium zwischen die umhüllte Platte und das Bleikästchen gelegt. Becquerel

hat seit Mai 1896 solche Stoffe in doppelten Bleikästen, vor aller äußeren Wirkung geschützt, aufbewahrt und selbstverständlich diese seither auch niemals wieder geöffnet; aber die Stoffe wirken durch den doppelten Bleiboden hindurch heute noch wie damals.

Man nannte die neuen Strahlen schwarzes Licht, recht bezeichnend in Bezug auf den tiefen Widerspruch, der in ihrem Wesen lag. Aber man hat diese Strahlen seither sichtbar gemacht, ja sogar sozusagen sichtbarer als jedes andere Licht. Die neusten Präparate bringen nicht nur durch ihre Bleihülle hindurch einen für ultraviolette Strahlen empfindlichen Schirm zum Leuchten, sondern geben auch ohne diesen durch die geschlossenen Augenlider hindurch einen Lichteindruck auf die Retina, die hierbei offenbar als Leuchtschirm wirkt. Man hatte diese Strahlen Uranstrahlen nennen wollen, aber die gleiche Eigenschaft ist inzwischen an einer ganzen Reihe anderer Stoffe meist in noch erhöhtem Maß entdeckt worden. Da man die Röntgenstrahlen bekanntlich auch X-Strahlen zu nennen pflegt, wollte man jene nun als Y-Strahlen bezeichnen. Aber diese Art von Bezeichnung ist unratsam, da wir doch hoffen, daß beide Wirkungen nicht dauernd zu den unbekannten zählen werden. Wir wollen dagegen bei der schönen Gewohnheit bleiben, den Entdeckern durch ihre Entdeckung selbst in den Annalen der Wissenschaft ein bleibendes Denkmal zu setzen, und sprechen fortan nur von Röntgen- und Becquerelstrahlen.

Wie schon gesagt, fand die Entdeckung zunächst wenig Glauben. Einen wie guten Klang auch der Name des Entdeckers haben mochte, man mußte doch irgend eine Täuschung voraussetzen, vor denen sich ja auch die sorgfältigsten Forscher nicht schützen können. Dazu kam, daß nicht alle Uranpräparate wirksam, radioaktiv waren. Es hing zuerst von unberechenbaren Launen des Zufalls ab, ob sich ein Präparat brauchbar erwies oder nicht. Das radioaktive Uran war darum ein sehr kostbarer Stoff und deswegen die Nachprüfung seiner Wunderwirkungen den anderen Physikern erschwert. Wir sehen diese sich kaum vor 1899 ernstlich mit der neuen Erscheinung beschäftigen, während schon im Jahre darauf mit geradezu fieberhaftem Eifer nach dem großen Rätsel geforscht wird, so daß die physikalischen Annalen des Jahres 1900 erfüllt sind von immer wunderbareren Mitteilungen über die Becquerelstrahlen, die stets mit dem schmerzlichen Geständnis enden, daß man ihrem Geheimnis nicht näher gekommen sei.

Die hier zu schildernden Wirkungen gingen von jenen Uranpräparaten nur in schwachem Maß aus. Inzwischen hat das Physiker-Ehepaar Curie in dem Mineral, welches bisher das Uran lieferte, der Pechblende, auf chemischem Wege zwei neue Stoffe entdeckt, die jene rätselhafte radioaktive Eigenschaft in bedeutend stärkerem Maße besitzen als die bisher bekannten Uranpräparate. Diese Pechblende, die nur an wenigen Orten vorkommt und allein in Joachimsthal im böhmischen Erzgebirge verarbeitet wird, ist ein ziemlich verwickeltes Gemisch von Stoffen. Außer dem Uran fand man darin Eisen, Blei, Magnesium, Calcium, Silicium, Arsen, Wismut, Selen, das sehr seltene Vanadium u. s. w. Es ist pechschwarz glänzend, woher es seinen Namen hat, und hat oft in der Natur nierenartige Form. Man hatte schon seit langem vermutet, daß es noch andere Beimengungen enthalte, die zunächst nicht von den anderen zu trennen seien. Das genannte Forscherpaar, welches sehr wertvolle Beiträge zur Kenntnis der Becquerelstrahlen geliefert hat, sonderte nun in diesem seltenen Mineral, wenn auch noch nicht in reinem Zustande, ein neues chemisches Element, das Radium, aus, das in Verbindung mit dem Baryum auftritt, so daß man bis jetzt eigentlich nur von radiumhaltigem Baryum sprechen kann. Das beste bisher hergestellte Präparat hat das Atomgewicht 174, während das des Baryums 137,5 ist. Jedenfalls ist also das Atomgewicht des neuen Elementes größer als 174, das demnach zu den schwereren Elementen gehört. Demarçay hat das

Spektrum der Mischung untersucht und darin außer den Barymlinien noch die folgenden neuen Linien gemessen: 482,63, 468,30, 434,06, 381,47, 364,96. Berndt fügte noch die Linie 270,86 im ultravioletten Teile hinzu. Die beiden Curie glaubten auch noch ein zweites Element, das **Polonium**, entdeckt zu haben, doch scheint es sich dabei nur um die Wirkungen von „Sekundärstrahlen" zu handeln, auf die wir zurückkommen. Von diesem problematischen Polonium, das in seinem chemischen Verhalten dem Wismut ähnlich ist, während das Radium dem Barym nahe steht, wurden 15 neue Linien gleichfalls von Berndt gemessen, die zwischen 459,63 und 232,73 liegen. Debierne meinte sogar noch einen dritten radioaktiven Stoff gefunden zu haben, das **Aktinium**, über das sich der Entdecker aber in geheimnisvolles Schweigen hüllt. Endlich hat Schmidt nachgewiesen, daß das seltene **Thorium**, welches zur Erzeugung der bekannten Glühstrümpfe verwendet wird, gleichfalls jene rätselhaften Strahlen aussendet. Im allgemeinen ist man dagegen zu der Überzeugung gekommen, daß das Uran diese Eigenschaft nur den minimalen Beimengungen jener neuentdeckten Stoffe zu danken hat. Die besten Präparate besitzt wohl gegenwärtig **Giesel** in Braunschweig, der als der Mitentdecker des Radiums und eifriger Forscher auf diesem Gebiete zu nennen ist. Diese neuesten Präparate zeigen mehrere tausendmal stärkere Wirkungen als jene Uranpräparate. Dafür aber haben sie einen um so größeren Wert, denn ein Gramm des wirksamsten Radiumpräparates wird nicht unter einigen tausend Mark zu haben sein.

Um nun im besonderen auf die Eigenschaften dieser merkwürdigen Substanzen zu kommen, müssen wir zunächst anführen, daß offenbar sehr verschiedene Strahlenarten von ihnen ausgehen, die stufenweise die Eigenschaften der Kathoden- bis zu den Röntgenstrahlen teilen. Demgemäß ist z. B. auch ihre **Durchdringungskraft** eine sehr verschiedene. Ein Teil der Radiumstrahlen wird von zwischenliegenden Substanzen sehr schnell absorbiert, so daß ihre Wirkung auf eine photographische Platte mit der zunehmenden Dicke der zwischengelegten Metallplatten oder anderen Substanzen stark abnahm. Von einer gewissen Dicke an aber bleibt die Wirkung der Dichtigkeit des Stoffes fast proportional, wie folgende von **Strutt** ermittelte Zahlen zeigen.

	Absorption (A)	Dichte (d)	A/d		Absorption (A)	Dichte (d)	A/d
Platin . . .	157,6	21,5	7,3	Glas	12,5	2,7	4,6
Blei . . .	62,5	11,4	5,5	Aluminium . .	11,6	2,7	4,3
Silber . . .	65,7	10,6	6,2	Kartenblatt . .	3,8	1,0	3,8
Eisen	52,2	7,8	6,7	Schwefeldioxyd .	0,041	0,0076	5,4

Wir sehen aus dieser Zusammenstellung, daß das Absorptionsvermögen sehr verschieden dichter Stoffe doch für eine gleiche Anzahl von Massenteilchen auf einem gleichen Raum sich kaum ändert, daß also die Durchdringungskraft nur von der Anzahl der den Strahlen entgegenstehenden Teilchen, nicht von ihrer besonderen Anordnung abhängt, die bei der Lichtabsorption offenbar eine Rolle spielt. Glas ist für diese Strahlen so durchsichtig wie Aluminium und weniger durchsichtig als ein Kartenblatt. Diese zahlenmäßigen Ergebnisse nähern die Becquerelstrahlen mehr den Kathoden- als den Röntgenstrahlen, soweit ihr Verhältnis zu den durchleuchteten Stoffen in Betracht kommt. Dagegen ist die Größe der Durchdringungsfähigkeit bei den Kathodenstrahlen, die ja Glas überhaupt nicht durchdringen, wesentlich geringer. In dieser Hinsicht sind wieder die Becquerel- den Röntgenstrahlen ähnlich. Die Partikelchen, welche von den radioaktiven Substanzen beständig und ohne nachweisbare äußere Wirkung ausgeschleudert werden müssen, sind also viel kleiner als die der eigentlichen Kathodenstrahlen, soweit diese nicht als Röntgenstrahlen die evakuierte Röhre verlassen.

In demselben Zusammenhange, den wir schon bei den Röntgenstrahlen als notwendig fanden, steht nun auch die Durchdringungsfähigkeit der Becquerelstrahlen mit ihren sonstigen optischen Eigenschaften. Sie sind nicht brechbar, werden nicht reflektiert, zeigen keine Polarisation und wahrscheinlich auch keine Beugung. Ihre etwa vorhandene Wellennatur ist demnach nicht nachweisbar. In allen diesen negativen Eigenschaften gleichen sie also den Röntgenstrahlen, von denen man sie in der ersten Zeit überhaupt nur durch ihren unbekannten Ursprung unterscheiden zu können glaubte.

Unter diesen Umständen war es interessant, zu erfahren, wie sich diese wunderbarsten der neuen Strahlengattungen elektrisch oder magnetisch verhalten, und hierbei zeigt es sich am deutlichsten, daß man es mit einem Gemisch von verschiedenen strahlenden Wirkungen zu tun haben muß. Die leicht absorbierbaren Poloniumstrahlen werden vom Magneten nicht abgelenkt, gleichen in dieser Hinsicht also den Röntgenstrahlen; die vom Radium ausgehenden Teilchen sind teils ablenkbar, teils nicht. Letztere sind wie die Poloniumstrahlen leicht absorbierbar und können dadurch von dem anderen Teile getrennt werden. Wenn man Strahlen dieser Art in ein Magnetfeld brachte, so zog sich das vorher diffuse Licht in der Richtung der magnetischen Kraftlinien zu einem stärker leuchtenden Fleck zusammen; sie verhielten sich also wie Kathodenstrahlen (Becquerel). Ferner beobachtete der Entdecker dieser Strahlen, daß sie in einem homogenen Magnetfelde senkrecht zu dessen Linien stehende Kreisbahnen beschreiben, so daß wir wieder die oft beschriebenen Wirbel vor uns haben. Bei einem Magnet von der Stärke von 4000 Einheiten hatten diese Bahnen einen Halbmesser von 3,7 mm. Entsprechend diesen magnetischen Wirkungen verhalten sich diese Strahlen auch im elektrischen Feld. Curie sowie Becquerel selbst wiesen nach, daß die betreffenden Teilchen ebenso wie die Kathodenstrahlen negativ elektrisch geladen sind.

Mit dieser negativen Ladung im Zusammenhange steht die wunderbarste aller Eigenschaften dieser Stoffe, ihre ungemein starke Einwirkung auf elektrische Entladungen in ihrer Nähe. Wir haben schon die Eigenschaft der früher erörterten verborgenen Strahlenarten einschließlich des ultravioletten Lichtes besprochen, die Luft leitend zu machen und dadurch die Elektrizität aus sonst isolierten Konduktoren zu entführen. Daher haben sie auch den früher (S. 403) geschilderten Einfluß auf die Funkenstrecke, den aber besonders die radioaktiven Stoffe in ganz erstaunlicher Weise ausüben. Wenn man in einem großen Hörsaale eine Elektrisiermaschine im Gange hat und kräftige Funken aus ihr gewinnt, so braucht man nur mit einer fast verschwindenden Menge jener besten Präparate des Radiums, die in einem Bleikästchen luftdicht verschlossen ist, in den Saal zu treten, um die Maschine ihre Tätigkeit sofort einstellen zu lassen. Es ist ganz unmöglich, Funken aus ihr zu ziehen, solange das Wunderkästchen nicht weit aus ihrem Dunstkreis entfernt ist. Man sollte hier beinahe verleitet sein, an übernatürliche Wirkungen zu glauben. Will man das Wunderbare an der Erscheinung hier noch weiter ausmalen, so könnten wir etwa annehmen, das Kästchen befände sich in der Tasche eines Anwesenden verborgen. Um es zu finden, müßte man den Saal verdunkeln und die Augen schließen. An einem allgemeinen Lichteindruck im geschlossenen Auge entdeckt man dann bei genügender Annäherung durch Bleikasten, Kleidung und Augenlider hindurch, wo die Ursache jenes Versagens der Elektrizitätsquelle sich befindet. Es folgt aus dieser Wirkung, daß, wenn der rätselhafte Stoff, der sich bisher überhaupt noch nicht ganz hat erfassen lassen, etwa so verbreitet auf der Erde wäre wie Gold, es niemals ein Gewitter auf unserem Planeten geben würde, denn die Elektrizitäten würden sich ganz unbemerkt ausgleichen. Der Mensch könnte also im Besitze

dieses Stoffes in beliebigen Mengen die gewaltigste aller Naturwirkungen unseres Weltkörpers ein für allemal durch die Kraft seiner Intelligenz verschwinden lassen und dadurch vielleicht unberechenbare Folgen für den gesamten irdischen Haushalt herbeiführen. Vielleicht schätzen wir es noch einmal als ein Glück, daß uns das große Geheimnis dieser Stoffe nicht zu früh eröffnet worden ist. In neuerer Zeit (1901) hört man bereits von beträchtlichen Fernwirkungen in diesem Sinne, welche unter Umständen zu einer neuen Telegraphie ohne Draht verwendet werden könnten. Allerdings muß es möglich sein, durch Einschalten von absorbierenden Stoffen nach Belieben eine beständig gespeiste Funkenstrecke zu unterbrechen und wiederherzustellen und dadurch Zeichen zu geben. Auch noch feinfühligere Einrichtungen zur Messung der schwankenden Leitungsfähigkeit der Luft werden zweifellos noch erfunden.

Von diesen geheimnisvollen Substanzen geht beständig ein Strom von Körperchen aus wie von der Kathode, der wir einen kräftigen elektrischen Strom zusenden. Bei der Kathode können wir einen von ihr ausgehenden Hagel von kleinsten Teilchen wohl verstehen. Nicht so verständlich ist der Vorgang dagegen bei jenen radioaktiven Stoffen, denen für diese Kraftentfaltung unserem Wissen nach keinerlei Ersatz zuströmt, und deren Ausstrahlung doch nicht ermattet. Aus der Wirkung einer äußeren Elektrizitätsquelle auf sie kann man ebenso wie bei den Kathodenstrahlen einen Schluß auf die Geschwindigkeit und ihr Verhältnis zur Masse der ausgeschleuderten Teilchen ziehen. Becquerel fand, daß sie sich zwei- bis dreimal so schnell als das Licht bewegen, und bestimmte danach ihre Größe ungefähr wie die der Kathodenstrahlen bildenden Materieteilchen. Man kann daraus weiter durch Abschätzung finden, daß die mit dieser Ausschleuderung verbundene Massenabgabe allerdings eine verschwindend geringe ist. Erst in etwa einer Milliarde von Jahren würde die radioaktive Substanz ein Milligramm verlieren. Dies ist die Rechnung von Becquerel; nach den beiden Curie kommt allerdings mehr heraus, denn es würden ihre verschwenderischeren Präparate schon 3 Milligramm in einer Million Jahre ausgeben.

In jüngster Zeit hat Kaufmann in Göttingen über die Energie und Geschwindigkeit dieser strahlenden Wirkung noch genauere Untersuchungen angestellt, worüber er in der Naturforscherversammlung zu Karlsbad im Herbst 1902 zuerst berichtete. Er ließ einen durch ein Diaphragma abgeblendeten Radiumstrahl auf eine photographische Platte fallen und den dadurch erzeugten Punkt durch einen Magnet ablenken. Wie schon erwähnt, zeigten sich dann die Strahlen verschieden ablenkbar, und es waren immer solche darunter, die überhaupt nicht vom Magnet beeinflußt wurden. Der Grad der maximalen Ablenkung war dadurch zu messen, daß der Magnet den Punkt auf der Platte zu einer Linie auszog. Die Ablenkung selbst hängt offenbar erstens von der Masse der ausgeschleuderten Partikelchen ab, zweitens von ihrer durch den Magnet erhaltenen elektrischen Ladung und endlich von der Geschwindigkeit, mit welcher diese ausgeschleudert werden. Es wurde nun eine größere Reihe von Messungen unter verschiedenen äußeren Bedingungen angestellt, welche zu dem wunderbaren Ergebnis führten, daß die strengen Messungsresultate nur unter der Bedingung mit der Theorie zu vereinbaren sind, daß man die Masse der ausgeschleuderten Teilchen gleich Null annimmt; ihre Geschwindigkeit ist dann nur um 4 Hundertstel kleiner als die des Lichts, stimmt also mit dieser fast überein. Die Messungen sind so genau, daß sie nur Fehler von 1,4 Prozent der betreffenden Zahlenangaben selbst zulassen. Wir haben nach diesen neuesten Untersuchungen also Wirkungen von eigentlichen Ätheratomen vor uns, die wir uns noch wesentlich kleiner vorstellen müssen als die Atome des Chemikers. Deshalb bedürfen sie allerdings auch nur einer sehr geringen Kraft, um mit einer so ungeheuern Geschwindigkeit ausgeschleudert zu werden.

Aber jede, auch die allergeringste Kraft, die ohne Ersatz beständig arbeitet, bleibt uns unverständlich. Man stelle sich in dieser Hinsicht folgendes vor. Die negativ geladenen, von jenen Stoffen ausgeschleuderten Teilchen erzeugen, wie die beiden Curie nachweisen konnten, durch ihren Aufprall auf Leiter, denen sie ihre Ladung übertragen, in diesen einen galvanischen Strom, der zwar sehr klein, aber immerhin meßbar ist. Hätte man nun große Mengen von jenen radioaktiven Stoffen zur Verfügung, so wäre es denkbar, nur dadurch z. B. eine Dynamomaschine in fortwährender Bewegung zu erhalten, daß man diesen Stoff in passender Anordnung neben der Maschine hinstellt, ohne sonst irgend etwas mit ihm vorzunehmen. Dabei bemerkt man an dem Stoffe weder eine Veränderung, noch eine meßbare Verminderung. Verhielte es sich wirklich so mit demselben, so müßten wir alle unsere Überzeugung, all unsere Gesetze über die Wirkungen der Naturkräfte verwerfen und eine ganz neue Grundanschauung von den Wechselbeziehungen zwischen Kraft und Materie gewinnen. Inzwischen aber ist es notwendig, alle innerhalb bekannter Gesetzlichkeiten möglichen Erklärungen sorgfältig zu prüfen.

Die phosphoreszierenden Wirkungen solcher Stoffe fordern in dieser Hinsicht zunächst zu einem Vergleiche mit bekannten ähnlichen Erscheinungen auf. Wir haben uns ja schon früher (S. 286) mit den Erscheinungen der Phosphoreszenz, Luminiszenz u. s. w. beschäftigt, die an einer ganzen Reihe von Stoffen wahrgenommen werden. Aber wir sahen, daß es sich dabei immer nur um vorübergehende Wirkungen handelte. Einige Stoffe sogen gewissermaßen das Licht, von welchem sie getroffen wurden, in ihre innersten Poren hinein, so daß sie einen Teil desselben erst allmählich wieder zurückgeben konnten. Wir kennzeichneten den Vorgang als ein Nachtönen der Lichtwellen in diesen Stoffen. Ähnliches findet aber bei den radioaktiven Stoffen nicht statt. Ihre Wirkung wird nicht durch Bestrahlung hervorgerufen oder auch nur verstärkt, und sie tönen nicht ab. Die gewöhnlichen phosphoreszierenden Körper erhöhen meistens ihre Wirkung bei Temperaturerhöhung, bei den radioaktiven Substanzen scheint aber eine vorübergehende Verminderung der Wirkung durch sie hervorgerufen zu werden; die Stoffe erholen sich indes nach einigen Tagen von selbst wieder. Allerdings geben Elster und Geitel an, daß bei der Erwärmung die Eigenschaft, die Elektrizität in der Luft zu zerstreuen, wesentlich wächst. Kälte hat nach Stefan Meyer und v. Schweidler keinen Einfluß auf die Radioaktivität, wie Versuche mit flüssiger Luft, also bei Temperaturen von etwa —200°, erwiesen. Nach Becquerel begann ein in flüssige Luft geworfener Urannitratkristall zu leuchten, hörte aber auf, Strahlen auszusenden, als er die gewöhnliche Temperatur wieder angenommen hatte. Die im gewöhnlichen Lichte phosphoreszierenden Stoffe tun dies im allgemeinen nicht in den neuen Strahlengattungen. Wir haben zur Erklärung dieser Eigenschaften anzunehmen, daß die völlig unsichtbaren Strahlen des Radiums die Barytumsalze, denen es beigemischt ist, in gewöhnliche Phosphoreszenz versetzen, weshalb die Präparate ohne weiteres leuchten. Die gewöhnliche Phosphoreszenzwirkung wird aber mit der Temperatur verändert. Deshalb hören unter Umständen bei Temperatursteigerung die Präparate auf zu leuchten, ohne daß die Kraft der eigentlichen Radiumstrahlen beeinträchtigt wird, die sich nach der Abkühlung wieder sichtbar macht. Die Radiumstrahlen teilen anderen Stoffen ihre Wirkung mit, so wie wir es schon bei den Röntgenstrahlen sahen. Auch die radioaktiven Substanzen erzeugen Sekundärstrahlen, aber hierbei sind wieder Ähnlichkeiten und Unterschiede mit den anderen neuen Strahlengattungen gemischt. Becquerel teilt mit, daß ein Diamant, der in Röntgenstrahlen nicht leuchtete, dies sehr stark in Radiumstrahlen tat; Schwefelkalium zeigte in den ersteren eine schwache Wirkung, eine starke in den letzteren, bei andern Stoffen war es auch umgekehrt. Auf Fluoridproben

wirkte das Tageslicht nur schwach, Bogenlicht stärker, am stärksten die Becquerelstrahlen, so daß ein Flußspat noch 24 Stunden nachleuchtete. Er hat die eigentümliche Eigenschaft, zu phosphoreszieren, wenn man ihn erhitzt, verliert sie aber dann ein für allemal, und nur ein in der Nähe überspringender elektrischer Funken oder das Belichten mit Becquerelstrahlen macht ihn wieder fähig zu phosphoreszieren. Die beiden Curie berichten, daß ein in ihrem Besitze befindliches Radiumpräparat, das allerdings bis zu 50,000mal stärker wirkt als die gewöhnlichen Uranpräparate, in einem völlig verschlossenen Kasten auf eine Metallplatte (Zink, Aluminium, Messing, Blei, Platin, Wismut, Nickel, auch Papier) gelegt, auf diese Stoffe seine Radioaktivität überträgt, so daß sie 10—17mal stärker wirken als Uran und erst nach einigen Tagen abschwächen. Debierne zeigte, daß die Übertragung der Radioaktivität durch die innigere Berührung bei chemischen Prozessen noch viel vollkommener zu erreichen ist. Er löste Chlorbaryum in einem „Aktiniumsalze“ und fällte dann schwefelsaures Baryum aus. Diese Operation wurde häufig wiederholt und so endlich ein Baryumsalz erhalten, das nach spektroskopischer Untersuchung selbst weder Radium noch Aktinium enthielt, aber doch eine etwa tausendmal stärkere sekundäre radioaktive Wirkung zeigte als gewöhnliches Uran. Die Wirkung war erst in drei Wochen auf ein Drittel herabgesunken.

Aus allen diesen Wahrnehmungen geht hervor, daß wir es hier nicht mit einer Phosphoreszenzerscheinung zu tun haben, die eine bekannte physikalische Ursache hat. Weder die Schwerkraft noch die Wärme, das Licht oder die Elektrizität bringen sie hervor oder haben einen merklichen Einfluß auf sie oder wenigstens auf einen Teil dieser verborgenen Strahlen, während ein anderer Teil allerdings von elektrischen Wirkungen abgelenkt wird. Die Strahlen selbst teilen Eigenschaften der Wärme, des Lichtes und der Elektrizität, ohne mit diesen Bewegungserscheinungen ganz übereinzustimmen. Dagegen ist auch nicht zu ermitteln, daß es sich etwa um eine bisher nicht wahrgenommene Bewegungsform des Stoffes oder des Äthers handelt. Am meisten Ähnlichkeit zeigt diese Form mit den geradlinigen Ätherstößen, durch welche wir uns die Wirkungen der Schwerkraft hervorgebracht dachten, wobei auch besonders zu beachten ist, daß ihre Durchdringungskraft nur noch von der Dichtigkeit abhängt, wie die Schwerkraft. Aber die zutage tretenden Erscheinungen sind ganz andere. Entweder handelt es sich hier um eine ganz neue Erscheinungsform der Materie, um eine neue Naturkraft, die etwa zu den bisher bekannten Wirkungen sich verhält wie der Magnetismus bei seiner Entdeckung zu den physikalischen Grundsätzen des Altertums, oder man nimmt vielleicht noch als Ursache eine sehr langsame chemische Reaktion an, von der Art, wie wir sie beim Phosphor kennen lernen werden.

In Bezug auf diese Frage nach der chemischen Natur der rätselhaften Erscheinung sind wir hier in der Notlage, von Vorgängen zu sprechen, deren Wesen wir noch nicht in das allgemeine Bild vom Naturgeschehen eingereiht haben, wie die übrigen physikalischen Vorgänge. Aber wir dürfen wohl als bekannt voraussetzen, daß die chemischen Erscheinungen auf Vermischungen und Trennungen von Stoffen beruhen. Das Leuchten des Phosphors entsteht z. B. dadurch, daß dieses Element sich mit Sauerstoff verbindet, so daß es langsam verbrennt. Alle chemisch hervorgebrachten Leuchterscheinungen werden durch eine langsamere oder schnellere Verbrennung, Oxydation verursacht. Das Produkt derselben hat andere Eigenschaften als die sich dabei verbindenden Teile, es kann z. B. nicht noch einmal brennen oder leuchten. Diese Wirkung muß aufhören, sobald der betreffende Brennstoff sich vollständig mit Sauerstoff gesättigt hat. Untersuchen wir daraufhin unsere radioaktiven Substanzen, so kommen wir wieder zu einem negativen Resultate. Wir können diese Stoffe im luftleeren Raume gänzlich von freiem

Sauerstoff abschließen, ohne ihr Leuchten oder ihre anderen Eigenschaften auch nur im geringsten zu vermindern. Freilich enthalten die Substanzen als Salze einen bereits an andere chemische Elemente gebundenen, d. h. schon einmal verbrannten Sauerstoff. Es hat sich in anderen Fällen gezeigt, daß unter solchen Umständen der Sauerstoff sich unter der stärkeren Wirkung eines anderen Stoffes freimachen und mit diesem verbinden kann. Eine solche innere Umsetzung könnte im vorliegenden Falle nicht unbedingt ausgeschlossen werden. Aber es ist dann immer notwendig, daß das Produkt derselben andere Eigenschaften hat als der ursprüngliche Körper. Bis jetzt hat man indes noch nicht die leiseste Veränderung nach jahrelanger unausgesetzter radioaktiver Wirkung nachweisen können. Eine chemische Wirkung von so ungemeiner Langsamkeit bei einer so deutlichen Kraftäußerung ist sonst niemals wahrgenommen worden. Wir enträtseln die Erscheinung mit dieser Annahme nicht. Ferner ist es eine charakteristische Eigenschaft aller chemischen Reaktionen, daß sie von gewissen Kältegraden an immer träger werden, bis sie schließlich bei den niedrigsten Temperaturen, die wir heute erzeugen können, meist gänzlich aufhören. Das Radium aber strahlt ganz ebenso bei —200° Kälte wie bei ebensoviel Wärme. Irgendwelche chemischen Einwirkungen, die wir mit den Stoffen vornehmen, ändern gleichfalls ihre strahlende Kraft nicht; dagegen übertragen sie sie, wie wir sahen, auf die Stoffe, welche mit ihnen Verbindungen eingegangen waren. Wasser zerstört zwar ihre Eigenschaft, die Luft leitend zu machen, aber nicht ihre strahlenden Wirkungen, und auch jene kehrt wieder zurück, wenn man die Stoffe ausglüht und dadurch vollständig aller Feuchtigkeit beraubt. Wegen dieses Einflusses der Feuchtigkeit auf die elektrischen Eigenschaften der radioaktiven Substanzen pflegt man sie in die Bleikästchen einzuschließen.

Während also chemische Eingriffe ebensowenig Einfluß auf diese wunderbaren Erscheinungen haben wie die physikalischen, üben diese Stoffe dagegen selbst chemische Wirkungen aus, wie sie physikalische hervorriefen. Von den photochemischen Wirkungen haben wir gleich zu Anfang sprechen müssen. Weiter teilen sie noch eine andere Eigenschaft mit den ultravioletten und den Röntgenstrahlen: sie ozonisieren die Luft, d. h. sie bringen eine Modifikation des Sauerstoffs in der freien Luft hervor, welche auch durch den elektrischen Funken und besonders durch die Gewitter erzeugt wird. Wir sehen auch hier wieder, wie die fast unsichtbaren Becquerelstrahlen auf das kräftigste in das molekulare Gefüge der Materie eingreifen. Es mag endlich erwähnt werden, daß die radioaktiven Substanzen Glas verändern. Frau Curie berichtet, daß die Stelle, wo ein solches Präparat eine Flaschenwand berührte, sich erst violett, dann nach etwa zehn Tagen fast ganz schwarz gefärbt hatte.

Also auch mit bekannten chemischen Wirkungen können wir die Erscheinungen der radioaktiven Substanzen nicht erklären. Diejenigen Forscher, welche bis jetzt am tiefsten in dieses geheimnisvolle Gebiet eingedrungen sind, wie namentlich Becquerel selbst, stellen sich den Vorgang etwa so vor, als ob ein ungemein feiner Stoff wie ein ätherisch flüchtiges Gas von jenen Substanzen ausgeht, um sich überall wieder zwischen den molekularen Poren der Stoffe in ihrer Umgebung festzusetzen und hier seine Wirkungen auszuüben. So setzt sich dieses Etwas an die Wände einer Glasflasche und macht sie radioaktiv; die Wirkung verschwindet aber durch Waschen des Glases mit Wasser. Geitel teilte in der Naturforscherversammlung von Hamburg 1901 ein außerordentlich interessantes Experiment mit. Verbindet man einen langen, in freier Luft ausgespannten Draht von beliebigem Metall einseitig nur mit dem negativen Pol einer Elektrizitätsquelle, so wird dieser Draht nach einiger Zeit radioaktiv und gibt diese Eigenschaft auch weiter ab an Stoffe, die mit ihm in Berührung gebracht werden. Geitel erklärt

diesen Vorgang dadurch, daß das Radium ein unbekanntes Gas in unserer Atmosphäre ist, das durch die negative Elektrizität in den Draht gezogen wird. Der Stoff kann aber selbst kaum ein Gas im gewöhnlichen Sinne sein; eine Röhre, in welcher eine radioaktive Substanz aufbewahrt wurde, und die an ihren Wänden dadurch selbst Sekundärstrahlen hervorbrachte, gab kein Spektrum irgend eines anderen Stoffes als des in der Röhre vorhandenen. Feinste Staubteilchen können aber auch nicht diese „Emanation“ verursachen. Wenigstens zeigte E. Rutherford, daß die Nebelbildung in jener Röhre sich nicht vergrößerte bei Gegenwart solcher Substanzen. Es ist erwiesen, daß die Anwesenheit allerfeinster Stäubchen in der von Feuchtigkeit übersättigten Luft Nebel erzeugt, und man wendet deshalb ein entsprechendes Verfahren an, um solche sonst gar nicht erkennbare kleinste Teilchen in der Luft nachzuweisen; im vorliegenden Falle geschah auch dies mit negativem Erfolge. Jener angenommene flüchtige Stoff muß also entweder viel feiner verteilt sein als die doch erstaunlichen Verdünnungen von Gasen, an denen wir noch spektroskopische und andere Beobachtungen vornehmen können, oder jene ausgeschleuderten kleinsten Teilchen sind überhaupt nicht mehr von der Ordnung der Moleküle und Atome, welche die bekannten physikalischen und chemischen Wirkungen hervorbringen. Man wird damit zu einer noch tieferen Stufe von Einheiten des Stoffes geführt, auf die auch die Schwerkraft keinen Einfluß mehr haben würde, und hätte es eben dann mit diesen Äther- oder Uratomen selbst zu tun, welche überall ungehindert zwischen den Massenatomen hindurchschwirren.

Die Ätheratome, deren Ströme, wie wir es uns vorgestellt haben, die Erscheinungen der Schwerkraft hervorbringen und nach unseren Anschauungen durch die Rückwirkung der „molekularen Planetensysteme“, von denen sie zum Teil reflektiert werden und dabei schraubenförmige Bewegungen annehmen, die Erscheinungen der strahlenden Wärme und des Lichtes veranlassen, können, angesichts ihrer vollkommenen durch die Schwerkraft nachgewiesenen Durchdringung der Körper, wohl auch jene Eigenschaften zeigen, die wir an den neuen Strahlen beobachten. Diese bestehen, wie wir sahen, aus einem vielartigen Gemisch von strahlenden Wirkungen. Von den sichtbaren Lichtschwingungen, die sowohl bei Röntgen- wie bei den Becquerelstrahlen nachgewiesen werden, zeigen sie alle Abstufungen bis zu wahrscheinlich wellenlosen Strahlen, die wir dann als eigentliche „Schwerkraftstrahlen“ anzusehen haben, welche nur deshalb kräftiger wirken als die übrigen, weil sie einen Geschwindigkeitsüberschuß besitzen. Hervorgerufen wird dieser durch die elektrischen Einwirkungen, die sich hier gleichfalls dadurch kundgeben, daß der Äther zum Teil auch elektrische Wellenbewegungen annimmt. Die Fernwirkung der radioaktiven Substanzen, namentlich ihre Fähigkeit, die Luftelektrizität zu zerstreuen, erscheint uns nicht mehr so sehr wunderbar, wenn wir folgende Entstehung für diese Strahlungsart annehmen: nicht ein direkt aus dem Inneren jener Substanzen entnommener Hagel von Teilchen, deren Energie erst in jenen Stoffen erzeugt werden müßte, ruft die Wirkung hervor, sondern die sie nur durchfliegenden Ätheratome, deren Bewegungsform in den Stoffen durch deren jedenfalls sehr eigentümliche molekulare Zusammensetzung verändert wird. Zu dieser Veränderung der Bewegungsformen wird selbstverständlich auch Energie verbraucht, aber doch wesentlich weniger als unter der Annahme der direkten „Emanation“. Diese Energie könnte vorläufig auf Kosten der inneren molekularen Bewegungen, d. h. der inneren Wärme, erhalten werden, die sich dann immer wieder durch Einstrahlung ersetzt. Es ist uns wohl bewußt, daß wir bei dieser Annahme gegen einen Satz der Wärmelehre verstoßen, nach welchem nur durch ein vorher schon vorhandenes Wärmegefälle äußere Arbeit geleistet werden kann





Hellere Kometen mit Schweifen.

a Komet Donati 1858. — b Komet Coggia 1874. — c Grosser September-Komet 1882. — d Komet Olbers 1887. —
e Komet Sawerthal 1888.

(S. 160 u. f.). Aber sowohl Maxwell wie Helmholtz haben zugegeben, daß Ausnahmen davon denkbar sind. Es schließen sich hieran sehr wichtige Erwägungen über die „entropischen" Fragen (S. 200), auf die wir bei unseren Schlußbetrachtungen zurückkommen. Bei der Wärme ist der Hebel für die Prüfung dieser Hypothese anzusetzen. Man würde mit feinsten bolometrischen Messungen zu untersuchen haben, ob den radioaktiven Substanzen nicht fortwährend sehr geringe Wärmemengen von außen zufließen. Wir hätten in diesem Fall ein Licht vor uns, das durch sein Leuchten Kälte statt Wärme hervorruft. Es ist schließlich nicht mehr zu verwundern, wenn zu all den Seltsamkeiten der verborgenen Strahlen auch noch diese kommen würde. Dabei ist im übrigen nicht ausgeschlossen, daß zugleich auch Partikelchen von äußerster Kleinheit jener radioaktiven Stoffe mit ausgeschleudert werden, wie es bei elektrischen Entladungen geschieht, und daß diese Teilchen die Übertragung der radioaktiven Eigenschaften auf die Gegenstände in ihrer Nähe besorgen (Sekundärstrahlen). Rutherford und Mc Clung haben die Energiemenge zu bestimmen versucht, welche von den Becquerelstrahlen ausgeht, indem sie sie mit den Wirkungen der ähnlichen Kathodenstrahlen verglichen, und fanden, daß ein Gramm des besten Radiumpräparates nicht weniger als 3000 Kalorien im Jahr erzeugt.

Da wir sahen, daß die Becquerelstrahlen teils den Kathoden-, teils den Röntgenstrahlen völlig gleich sind, während die ersteren doch nicht wie diese durch elektrische Wirkungen hervorgerufen wurden, so ist kein Zweifel mehr, daß die Kathoden- sowohl wie die Röntgenstrahlen nur Begleiterscheinungen der elektrischen Entladungen, nicht das Wesentliche darstellen, und daß diese Strahlen selbst eigentlich nicht elektrischer Natur sind. Nach einer Anfang 1901 gegebenen Zusammenfassung kommt Goldstein zu dem Resultat, daß das ultraviolette Licht alle Eigenschaften der Kathoden-, Röntgen- und Becquerelstrahlen in sich vereint, daß wir es also bei ihm mit der Erregung von extrem kurzen Ätherschwingungen zu tun haben. Jedenfalls steht hier eine ganz neue Erscheinungs- und Wirkungsform der Materie vor uns, die den Forschungseifer mehr als je in jene letzten Tiefen des Naturgeschehens lenkt, wo alle Eigenschaft nur noch Bewegung ist. Die Bewegungen des Äthers, die wir bisher immer nur aus ziemlich verwickelten theoretischen Betrachtungen ableiten konnten, scheinen angesichts der Freiheit, welche ihnen diese neuentdeckten Vorgänge geben, mehr und mehr in den Bereich direkter Anschauung zu gelangen. Wir beginnen hier in die Geheimnisse der Welt des Äthers zu blicken, der der Träger aller Naturwirkung ist, und wie bei allen solchen Forschungen wird auch dieses große Rätsel nach seiner Lösung nur eine neue vertiefende Bestätigung unserer Grundanschauungen geben und unseren Blick gewiß in vorher ungeahnter Weise klären.

Wir dürfen dieses Kapitel nicht schließen, ohne zu erwähnen, daß die geheimnisvollste der Erscheinungen am gestirnten Himmel, die eines großen Kometen mit seinem langgestreckten Schweife, vielleicht ähnlichen Vorgängen ihre Entstehung verdankt wie jene nicht minder rätselhaften Strahlen. Das über Millionen von Meilen ausgebreitete Licht der Kometenschweife, von denen wir in beifolgender Tafel einige abgebildet haben, ist, soweit wir ermitteln können, dem jener Glimmerscheinungen in der Kathodenröhre gleich. Die Materie der Schweife, von dem es ausgeht, ist wesenlos, wie wir jene der verborgenen Strahlen wohl auch nennen müssen. Mögen auch Räume, in denen die Erdkugel viele Male hintereinander Platz hätte, davon ausgefüllt sein, es bleiben die leuchtenden Schweife dennoch für das Licht der hinter ihnen stehenden Sterne durchsichtig. Aber wie sehr diese leuchtende Materie auch dem Nichts verwandt sein mag, sie ist doch, wie die der Kathoden- und der Becquerelstrahlen, elektrisch geladen, denn sie wird von der Sonne, dem großen Konduktor, abgestoßen, mit Geschwindigkeiten, die durch die Krümmung

der Schweife in ganz ähnlicher Weise vermittelt werden konnten, wie die der Kathodenstrahlen aus der Ablenkung durch den Magnet. Die Geschwindigkeit der Schweifmaterie ist der jener Strahlen entsprechend (vgl. des Verfassers „Weltgebäude", S. 268 u. f.). Auch der Sonne zugewandte Schweife hat man beobachtet, die vielleicht mit den Goldsteinschen Kanalstrahlen in Verbindung zu bringen sind. Nach Lenard (S. 397) brauchen wir nicht einmal eine direkte elektrische Fernwirkung der Sonne dabei anzunehmen. Die ultravioletten Strahlen im Sonnenlicht, die wir ja auch auf der Erde beobachten, bringen auf dem Kometenkerne negative elektrische Ladungen hervor und verwandeln ihn, genau in der Weise wie in dem genannten Experiment, in eine Kathode, von der Strahlen in den leeren Raum jenseits der Lichtquelle ausgesandt werden. Am Ende des Schweifes, der sich immer ganz unmerklich im dunkeln Himmelsgrunde verliert, zerstreut sich die ausgestrahlte Elektrizität in den Raum. Der Einwand, den man früher gegen kosmische Fernwirkungen der Elektrizität erhob, daß der sogenannte leere Raum ein absoluter Nichtleiter sein müsse, ist durch das Experiment widerlegt. Außerdem befinden sich im interplanetaren Raum immer so viele Wolken von kosmischen Meteoren, die zum größeren Teil aus Eisen bestehen, daß schon durch sie allein Wechselbeziehungen zwischen den kosmischen Elektrizitätsquellen unterhalten werden müssen. Mit den feinen Messungsmethoden, die der modernen Physik zu Gebote stehen, wird man vielleicht bei der Erscheinung eines nächsten großen Kometen dessen elektrische Wirkung auf uns direkt messen können, wenn sein Schweif gegen die Erde hin gerichtet ist.

Immer mehr muß man einsehen, daß die Erscheinungen auf unserem Erdball nicht nur von den offenkundigen Strahlen der Wärme und des Lichtes des großen Zentralgestirnes beeinflußt werden, sondern daß alle physischen Vorgänge, deren Träger der Äther zwischen den Gestirnen wie zwischen den Atomen der molekularen Welten ist, beständige Wechselbeziehungen aller Art mit allen diesen Materiegruppen unterhalten. Keine ist von der anderen abgeschlossen, und es wäre sehr zu verwundern, wenn nur die elektrischen Wirkungen hiervon eine Ausnahme machen sollten. Die Bewegungen der erdmagnetischen Elemente, das Aufflackern der Polarlichter, die Erdströme, die Schwankungen der Luftelektrizität, der Ursprung der Gewitter und manche andere Erscheinungen, nach deren Ursachen man bisher vergebens auf der Erde sucht, werden vielleicht einmal aus solchen kosmischen Wirkungen ihre direkte oder indirekte Erklärung finden. Auf jeden Fall kann man nicht genug daran erinnern, daß auch der Physiker seinen geozentrischen Standpunkt aufgeben muß, wie es der Astronom seit Kopernikus tat, und die forschenden Blicke dorthin emporheben soll, wo wir in Weltkörperdimensionen schauen, was wir mit unseren feinsten Werkzeugen im kleinsten Raume der molekularen Welten noch lange vergebens suchen.

Zweiter Teil.

Die chemischen Erscheinungen.

1. Einleitende Betrachtungen.

Überall in den vorangegangenen Betrachtungen haben wir davon gesprochen, wie die verschiedenen Eigenschaften der Stoffe die Wirkung der Naturkräfte hervorrufen und abändern, und wie sich für jeden Stoff besondere Zahlenwerte finden lassen, nach welchen in jedem besonderen Fall die Wirkung der Naturkräfte ausgedrückt werden kann. Wir sahen also, daß die Eigenschaften dieser Stoffe einen sehr wesentlichen Einfluß auf die Naturerscheinungen nehmen, die uns hier beschäftigen. Die Schwerkraft wirkt zwar auf alle Körper gleich, denn eine Bombe fällt im leeren Raume genau so schnell wie eine Holundermarkkugel. Aber die Allgemeingültigkeit der Schweregesetze steht unter den anderen Wirkungen der Naturkräfte auch einzig da. Schon das Gewicht der Körper, das eine direkte Folge der Schwerkraft ist, unterscheidet die verschiedenen Stoffe voneinander: ein Stück Holundermark ist leichter als ein gleichgroßes Stück Eisen. Wir bestimmten die Dichtigkeit der Stoffe und brachten diese Eigenschaft durch eine für jeden Stoff verschiedene Zahl zum Ausdruck. Später kamen noch viele andere Zahlen hinzu, durch die man für jeden Stoff den Grad der Härte, der Dehnbarkeit, der Elastizität, den Gefrier- und den Siedepunkt, das Wärmeaufnahme- und Leitungs-, das Lichtbrechungs-, Absorptions- und Reflexionsvermögen, die Wellenlängen seines Eigenlichtes, seine Dielektrizitätskonstante, seine Magnetisierungszahl, sein elektrisches Leitungsvermögen und manche andere Eigenschaften festgestellt hat. Jeder Stoff erhält somit sein ihm eigentümliches Gepräge, und gerade diese Verschiedenartigkeit der miteinander in Beziehung tretenden Stoffe ist es, welche die Wirkung der Naturkräfte auslöst und für uns sichtbar werden läßt. Gleiche Stoffe unter gleichen physikalischen Bedingungen können keine Wirkung ausüben. Anderseits würde es schlecht um unsere Überzeugung von der Einheit der Naturkräfte stehen, wenn wir für jeden Stoff besondere Bedingungen einführen müßten, nach denen jene als allgemein gültig angesehenen Gesetze des Geschehens in jedem einzelnen Falle wieder verändert auftreten würden. Es müssen unter diesen individuellen Eigenschaften der Stoffe wieder Gesetzmäßigkeiten gefunden werden, die sie untereinander einheitlich verbinden. In den Wirkungen der verschiedenen Naturkräfte auf ein und denselben Stoff haben wir bereits manche solcher einheitlichen Züge entdeckt, namentlich in den Beziehungen der Dielektrizitätskonstante zum Brechungsvermögen (S. 327) oder zwischen dem Wärme- und Elektrizitätsleitungsvermögen (S. 336). Diese und

alle die anderen einheitlichen Züge erkannten wir als die Folge der gleichen Bewegungsform des Mittels, das die Wirkungen überträgt, der Wellenbewegung des Äthers. Aber die Größe und die Verschlingungen dieser Wellen waren von unendlicher Mannigfaltigkeit, und wir mußten zu ihrer Erklärung annehmen, daß das molekulare Gefüge der Stoffe, von denen diese Mannigfaltigkeit der Wirkungen ausgeht, ebenso vielartig beschaffen sei. Für das Vorhandensein dieses molekularen Aufbaues der Materie und seine Vielartigkeit schafften wir bereits manches Beweismaterial herbei. Aber erst die Aufgabe der chemischen Wissenschaft ist es, tiefer in die geheimnisvolle Welt der Atome einzudringen, die Gesetze ihrer Gruppierungen und ihrer treibenden Kräfte zu erforschen und dadurch erst das Gemeinsame in der Vielheit von Sonderwirkungen zu suchen, mit denen jeder einzelne Stoff individuell in das Naturgeschehen eingreift. Der chemischen Wissenschaft wird es deshalb vorbehalten sein, den Schlußstein in das stolze Gebäude von der Einheit der Naturkräfte zu fügen.

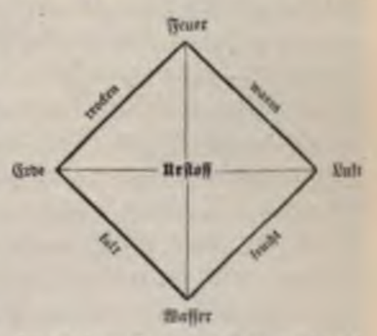
Aber wir erkennen dadurch auch die enge Verwandtschaft der chemischen mit der physikalischen Wissenschaft. Denn wir konnten von den physikalischen Wirkungen der Stoffe nicht reden, ohne Eigenschaften in Betracht zu ziehen, die erst der Chemiker uns recht erkennen lehrt, und anderseits greifen die rein physikalischen Wirkungen so tief in alle chemischen Erscheinungen ein, daß ihr Verständnis ohne jene gar nicht denkbar ist.

Die Arbeitsgebiete beider Wissenschaften durchdringen sich überall, und eine strenge Grenze ist zwischen ihnen nicht zu ziehen. Man hat die Chemie die Lehre von den Mischungsverhältnissen genannt, unter denen die bekannten Stoffe miteinander in Verbindung treten oder sich trennen. Da die bloßen Gemenge, die man in beliebiger Weise herstellen kann, wie etwa ein Gemisch von Wasser und Zucker, sich von den eigentlichen chemischen Verbindungen dadurch unterscheiden, daß diese nur in ganz bestimmten Zahlenverhältnissen zusammentreten, so ließe sich hier wohl die Grenze ziehen. Aber gerade die Einheitlichkeit der Naturwirkungen, deren Erkenntnis das Endziel aller unserer Forschungen sein soll, hat auch den Chemiker längst gezwungen, so strenge Abgrenzungen zu durchbrechen. Er muß die Gesamtheit der Erscheinungen auffassen, um die chemischen Wirkungen zu erklären, und da zeigt es sich, daß auch die bloßen sogenannten physikalischen Gemische manche Eigenschaften mit den chemischen Vereinigungen der Stoffe gemein haben. Wir wollen es aus allen diesen Gründen als die Aufgabe der modernen Chemie betrachten, die dauernden Veränderungen und deren Gesetzmäßigkeiten zu erforschen, die die Einwirkung der Stoffe aufeinander oder die Einwirkung einer Naturkraft auf sie hervorbringt.

Die Stoffe, die wir zu unseren physikalischen Versuchen verwendeten, Eisen, Kupfer, Zink, Glas u. s. w., kommen in der Natur meist nicht in dem Zustande vor, in dem wir sie kennen, sondern müssen aus den Rohprodukten gewonnen werden. Dies bewirkt die praktische Kunst des Chemikers, die uralt ist. Seit man die trennende Kraft des Feuers kennt, schmelzen die Menschen Bronze und Eisen aus den Erzen aus, indem sie diese mit der reduzierenden Kohle zusammenbringen, wodurch das chemische Element des Metalles aus seiner festen Verbindung mit dem Sauerstoff gelöst wird. Durch diese Kunst hat sich die Menschheit aus der primitiven Stufe der Steinzeit in die der Bronze- und Eisenzeit emporgeschwungen, und entscheidende Wendepunkte in unserer allgemeinen Kulturentwickelung sind durch die Auffindung dieser chemischen Reaktionen markiert. Manche andere chemischen Kenntnisse besaßen seit unbekannten Zeiten die beiden ältesten Nationen, die Ägypter und die Chinesen. Von den ersteren rührt sogar noch die heutige Benennung dieser Wissenschaft her, denn nach Plutarch nannten

die Ägypter ihr Land Chemi oder Chami, was soviel wie schwarzes Erdreich bedeutete. Man bezeichnete deshalb auch noch im Mittelalter die Chemie als die ägyptische oder Schwarzkunst, auch die geheime Kunst, da sie von den Ägyptern sowohl wie im Mittelalter streng geheim gehalten wurde. Dies ist der Grund, weshalb sich diese uralte Wissenschaft so langsam entwickelte. Es scheint zwar, daß die ägyptische Priesterschaft bereits viele chemische Kenntnisse besessen hat, deren Übermittelung durch die Zerstörung der alexandrinischen Bibliothek mit so vielen anderen, von jener großen Nation am Nil in Jahrtausenden gesammelten Wissensschätzen uns abgeschnitten wurde. Seitdem herrschten die Naturanschauungen des *Aristoteles*, die von tiefem philosophischen Geiste durchdrungen waren, aber viel zu lange geradezu wie heilige Offenbarungen als völlig unantastbar galten.

Aristoteles hatte gelehrt, wovon wir auch heute noch überzeugt sind, daß *alles Seiende aus einem einzigen Urstoff und seinen Wandlungen zu erklären sei.* Das ist derselbe Grundgedanke, der uns bei allen Betrachtungen dieses Werkes leitet. Dieser Urstoff war unsichtbar, eigenschaftslos, formlos gedacht, gewissermaßen als das „Ding an sich". Aus ihm hatten sich die vier aristotelischen Elemente *Feuer, Luft, Wasser, Erde* gebildet, die in beständiger Wechselbeziehung ineinander übergehen und dadurch die Gesamtheit der Naturerscheinungen und der Dinge selbst hervorbringen. Diese Übergänge wurden durch das nebenstehende Diagramm versinnlicht, das folgender Erwägung entsprang. Das Feuer ist zugleich trocken und warm, die Luft warm und feucht, das Wasser feucht und kalt, die Erde kalt und trocken. Setzen wir für diese vier Elemente diejenigen Abstraktionen, die dabei dem griechischen Naturkundigen sicher vorschwebten, nehmen wir für das Feuer die einheitliche Naturkraft, die sich in ihren Hauptwirkungen als Wärme kundgibt, und für Luft, Wasser und Erde die drei entsprechenden Aggregatzustände der Materie, so gilt der aristotelische Grundgedanke in diesem modernen Gewand auch heute noch für unsere Naturforschung, die ebenso an einen einheitlichen Urstoff glaubt, dessen Wechselwirkungen mit seiner Urkraft, d. h. mit seiner Bewegung, diese große Mannigfaltigkeit des Vorhandenen und seiner Erscheinungen schafft.



Aristoteles' Diagramm der vier Elemente und ihrer gegenseitigen Beziehungen.

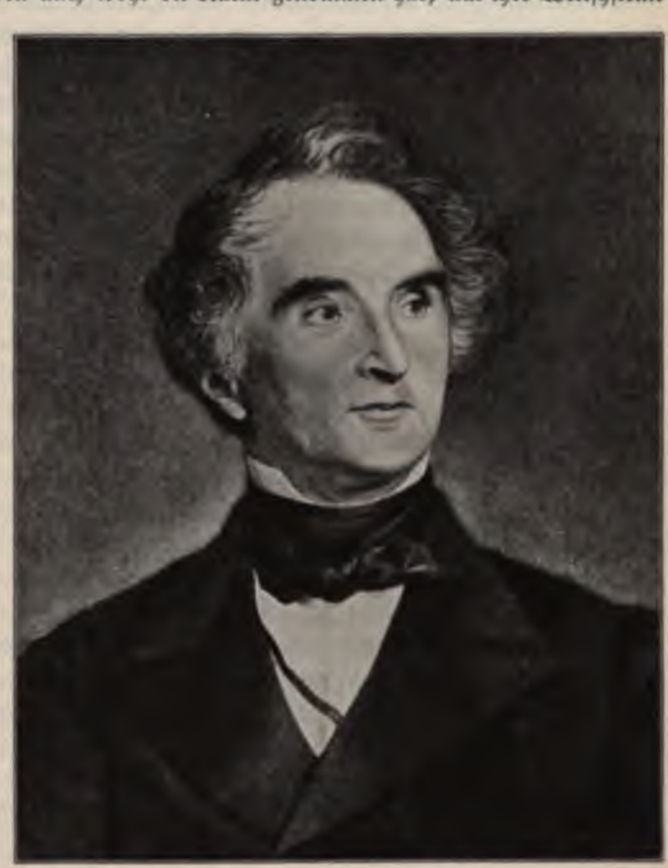
Wie vieles kann man unter diesem Gesichtspunkt aus jenem Diagramm herauslesen! Mischen wir die Erde mit dem Feuer, so wird sie zu Luft, d. h. wir machen die festen Stoffe durch Wärme gasförmig. Je mehr wir aber dem Gase seine Wärme entziehen, desto mehr nähern wir es dem tropfbaren Zustand: auf dem Diagramm gehen wir weiter nach unten. In der Natur sah man, wie es aus der Luft herabregnet, wenn es kälter wird. Die Wahrnehmung, wie ein und derselbe Stoff, das Wasser, in seinen drei Aggregatzuständen ganz verschiedene Eigenschaften hat, konnte mit gutem Grunde zur Vermutung führen, daß auch alle anderen bekannten Stoffe nur Verwandlungen eines einzigen Stoffes seien, die wegen verschiedener Mischungsverhältnisse so verschiedene Eigenschaften zeigen. Das war ein vollkommen logischer und durchaus nicht unwissenschaftlicher Gedanke. Die moderne Chemie weist Hunderte von Beispielen auf, in denen verschiedene Mischungsverhältnisse ihren Produkten grundverschiedene Eigenschaften geben. Man nehme nur das Beispiel der atmosphärischen Luft mit ihrem Wassergehalt. Ohne etwas dazu zu tun oder davon zu nehmen, sondern nur indem man ihren Sauerstoff-,

Stickstoff- und Wasserstoffgehalt (im Wasserdampf) der Menge nach verändert und diese Elemente chemisch zusammenfügt, kann man aus der lebenerhaltenden Luft die zersetzende, höchst giftige Salpetersäure bilden. Freilich haben wir an die Stelle der drei aristotelischen Elemente Erde, Wasser und Luft einige siebzig setzen müssen, die in der Verbindung mit den Naturkräften die Welt zusammensetzen und erhalten. Aber gerade in den letzten Jahrzehnten sind so eigentümliche Beziehungen dieser Elemente untereinander aufgefunden worden, die uns noch eingehend beschäftigen werden, daß es gar keinem Zweifel mehr unterliegt, daß sie alle einen einfachen, gemeinsamen Ursprung haben, ganz ebenso wie die Naturkräfte sich mehr und mehr auf eine einzige Bewegungsform zurückführen lassen. So läßt es sich denken, daß als oberste Prinzipien der Natur einstmals nur zwei von den aristotelischen Elementen, Erde und Feuer, der Urstoff und seine Kraft, die Bewegung, übrigbleiben, aus denen sich die Welt aufbaut, wie wir aus denselben gleichen Steinen die verschiedenartigsten Gebäude errichten.

Griffen wir hier auf die Ansichten des griechischen Weltweisen zurück, so war es nicht, um damit einen Abriß der geschichtlichen Entwickelung der Chemie einzuleiten, sondern um den ersten Keim derjenigen Ansichten aufzudecken, welche gerade für die moderne Forschung leitend sind. Wir haben deshalb keinen Grund, über die Überzeugung der mittelalterlichen Alchimisten zu lächeln, daß man aus jedem beliebigen Stoff Gold machen könne; nur die naiven oder mystischen Mittel, die sie anwendeten, um den Urstoff zu dem begehrten Metall zusammenzufügen, mögen uns heute befremden. Jedenfalls aber ist es tief zu bedauern, daß die uralte Wissenschaft der Chemie, die schon vor mehr als 2000 Jahren auf dem richtigen Wege war, durch die eigennützigen Bestrebungen der Alchimisten in eine so ganz einseitige Richtung gedrängt wurde. Wenn auch dadurch manche vorbereitenden Kenntnisse gewonnen wurden, so hörte doch die Chemie auf, eine Wissenschaft zu sein, und wurde es erst wieder, als um die Mitte des 17. Jahrhunderts Robert Boyle mit den falsch verstandenen aristotelischen Lehren aufräumte und riet, zunächst jeden Stoff, den man vorläufig nicht zerlegen könne, als einfach anzusehen, um in dieser Zerlegung systematischer vorzugehen. Er war gleichzeitig der Erste, welchem die Idee der Atome vorschwebte, aber diese Ansichten vermochten zunächst nur wenig Boden zu fassen. Es kam die Lehre vom sogenannten Phlogiston zur Geltung, dem Brennstoff, der sich aus den verbrennenden oder verkalkenden (oxydierenden, wie wir heute sagen) Stoffen bildete und der Luft mitteilte, die dadurch selbst unbrennbar wurde. Dieses Phlogiston war eigentlich unser Sauerstoff, nur, wenn wir uns so ausdrücken dürfen, mit entgegengesetzter Bewegungsrichtung: das Phlogiston sollte bei der Verbrennung entweichen, der Sauerstoff wird umgekehrt dadurch gebunden. Eine quantitative Untersuchung unter Abschluß der freien Luft mußte beweisen, daß die verbrennenden Körper in der Tat schwerer statt leichter werden und einen Teil der Luft in sich aufnehmen. Dies zeigte zuerst 1774 Lavoisier und entdeckte dadurch den Sauerstoff, den er zugleich als die Ursache aller Verbrennungsprozesse erkannte. Seine Entdeckung gab den entscheidenden Anstoß zu der modernen Entwickelung der Chemie, die demnach als eigentliche Wissenschaft, trotz ihrer Anfänge in den Urzeiten der Menschheit, kaum mehr als hundert Jahre alt genannt werden darf.

Wir begreifen nach diesem kurzen Überblicke der Irrwege dieser Wissenschaft, daß die Kenntnis von den verbreitetsten Grundstoffen und ihrer Gewinnung aus den Mineralien auf sehr verwickelten Wegen und meist durch Zufall erlangt worden ist. Es würde deshalb für die weitere Entwickelung unserer Anschauungen nicht fruchtbar sein, wenn wir hier verfolgen wollten, wie man durch die Behandlung der in der Natur vorkommenden mineralischen und

anderen Stoffe zu der Erkenntnis gelangte, daß sie meist Verbindungen einfacherer, in der Natur zum Teil nur selten oder gar nicht ungebunden vorkommender Stoffe, der sogenannten **chemischen Elemente** sind, die sich mit den gegenwärtigen Hilfsmitteln nicht mehr in noch einfachere Stoffe trennen lassen. Wir gehen am besten von diesen Elementen selbst aus und verfolgen systematisch den Aufbau des Vorhandenen aus diesen Grundstoffen. Auf diese Weise betreten wir denselben Weg, den auch wohl die Natur genommen hat, um ihre Weltsysteme von den Molekülen bis zu den Sonnen aufzubauen. Aus den spektralanalytischen Untersuchungen in Verbindung mit anderen physikalischen und chemischen Erkenntnissen geht mit Sicherheit hervor, daß alle die chemischen Elemente, die wir auf unserer Sonne nachweisen konnten, dort noch im unverbundenen, dissoziierten Zustande vorhanden sind. Die Sonne befindet sich in einem Anfangsstadium der Weltbildung, und vielleicht finden, wie wir schon an anderer Stelle (S. 186) hervorhoben, die ersten chemischen Vereinigungen dort statt, wo wir Sonnenflecke entstehen sehen. Die fortschreitende Abkühlung gestattete die Bildung immer komplizierterer Moleküle, bis endlich das Auftreten der Organismen aus wenigen Elementen so ungemein verwickelte Molekularsysteme schaffen konnte, daß all unser Scharfsinn und unsere Beobachtungskunst sich heute noch ohnmächtig erweist, um ihre wahren Zusammensetzungen zu erforschen oder wiederherzustellen, wiewohl wir wissen, daß mit der chemischen Erkenntnis dieser organisierten Substanzen, wie der Stärke, des Eiweiß, oder gar des Chlorophylls und des Protoplasmas, ein neues, glücklicheres Zeitalter für die Menschheit anbrechen müßte, das uns mit der künstlichen Zubereitung der Nahrungsmittel einen großen Teil unserer materiellen Sorgen von den Schultern nehmen würde.



Justus von Liebig. Nach Werckmeister, „Das 19. Jahrhundert in Bildnissen“. Vgl. Text, S. 424.

Aber die Aufgabe der Chemie ist es nicht nur, die in der Natur vorkommenden Stoffe aus jenen Elementen wieder aufzubauen; sie erzeugt auch neue Stoffe durch solche Zusammensetzungen, die oft sehr wertvolle Eigenschaften für Technik und Industrie haben. Dadurch ist die Chemie zu einer mächtigen Gehilfin des Menschen geworden. Leider können wir uns hier

mit diesen Aufgaben der praktischen Chemie und der chemischen Technologie nicht näher beschäftigen; wir werden nur gelegentlich einige Beispiele davon aufführen, die Beziehungen zu den allgemeinen Gesichtspunkten dieses Werkes haben.

Man pflegte die chemische Wissenschaft in zwei Hauptteile, die anorganische und die organische Chemie, zu zerlegen. Die erstere befaßt sich mit den Körpern der sogenannten toten Natur. Sie sondert aus den natürlichen Gesteinen, aus der Luft und den Gewässern ihre einfachen Bestandteile aus und fügt aus ihnen wieder alle möglichen Verbindungen zusammen. Die organische Chemie behandelt in gleicher Weise die Substanzen, die in der Natur nur von den Organismen gebildet werden. Früher war durch äußere Unterschiede zwischen diesen beiden Abteilungen eine sehr deutliche Grenze gezogen. Während es nämlich immer gelang, die Verbindungen, mit denen sich die anorganische Chemie beschäftigt, aus den Elementen wieder herzustellen, also nicht nur ihre Analyse, sondern auch ihre Synthese auszuführen, gelang letztere für die organischen Substanzen nicht. Seit aber 1828 Wöhler zuerst den Harnstoff künstlich herstellte, und später namentlich durch dessen theoretisch klärenden Arbeiten und die Untersuchungen des genialen Liebig (s. die Abbildung, S. 423), durch Kekulé, Berthelot, Hoffmann und andere viele weitere Synthesen von Stoffen gelangen, die bisher nur in geheimnisvoller Weise durch den Eingriff der bis dahin angenommenen Lebenskraft in den lebenden Organismen sich bildeten, wurden die Grenzen zwischen jenen beiden Abteilungen immer mehr durchbrochen. Freilich betrafen jene Synthesen bisher immer nur solche Substanzen, die bei den Prozessen in den organischen Wesen gewissermaßen als Nebenprodukte oder bei deren Zersetzung auftreten, wie die Öle, die in den Organismen vorkommenden Säuren, die aromatischen Stoffe, welche als angenehme oder widerliche Gerüche von den Organismen ausgesondert werden, oder die meist sehr giftigen sogenannten Alkaloide, die sich unter anderen bei dem Fäulnisprozeß in Leichnamen bilden. Die in den lebenden Zellgeweben selbst vorhandenen und an den inneren Wechselbeziehungen im Organismus hauptsächlich beteiligten Stoffe, die allein in den Pflanzen aus den Elementen zusammengesetzt werden und den Tieren zur ausschließlichen Nahrung dienen, können wir leider ohne Ausnahme noch nicht herstellen, denn diese chemischen Prozesse, welche in der Pflanze vor sich gehen, sind uns immer noch ungelöste Rätsel. Aber alles spricht dafür, daß sie auf den Wegen, in welche die chemische Wissenschaft in den letzten Jahrzehnten eingelenkt ist, gelöst werden können. Es gelingen Schritt für Schritt Synthesen von immer verwickelteren Verbindungen, die in der Richtung zu jenem höchsten Ziele der organischen Chemie liegen.

Da also das Gebiet der nicht ausführbaren organischen Synthesen sich immer weiter einschränkt, so verschmelzen die beiden Abteilungen der Chemie mehr und mehr ineinander. Man kann sie heute eigentlich nur in einer rein formellen, nicht mehr das Wesen betreffenden Weise trennen, indem man die organische Chemie die der Kohlenstoffverbindungen nennt, weil alle organischen Verbindungen als Hauptbestandteil den Kohlenstoff enthalten, der in ihnen mit verhältnismäßig wenig anderen Elementen in viel mannigfaltigerer Weise kombiniert ist, als diese untereinander in Verbindung treten. Schon aus praktischen Gründen mußten deshalb die so zahlreichen Kohlenstoffverbindungen in eine besondere Abteilung verwiesen werden. Nur diejenigen, welche auch in der nicht organisierten Natur vorkommen, sind in der Abteilung der anorganischen Chemie gelassen worden und bilden vielfach einen gewissen Übergang zwischen den beiden Gebieten.

Im folgenden geben wir zunächst einen mehr schematisch zusammenfassenden Überblick der chemischen Vorgänge, um mit dem Gegenstande selbst vertraut zu werden, ehe wir diese neuen Erscheinungsgruppen mit den schon betrachteten physikalischen Erkenntnissen in Beziehung bringen.

2. Überblick der anorganischen Verbindungen.

Die Zahl der in der Erdrinde gefundenen verschiedenartigen Gesteine, aus denen man die uns hier beschäftigenden chemischen Elemente gewonnen hat, beläuft sich etwa auf 700. Man unterscheidet die eigentlichen gebirgsbildenden Gesteine von den Erzen, die als Adern in sie eingesprengt sind, und von den vulkanischen Gebilden, den Erden u. s. w. Die in den Gewässern und der Luft vorkommenden Grundstoffe finden sich in den Gesteinen auch wieder, mit Ausnahme einiger erst in den letzten Jahren aufgefundenen, sehr geringen Beimischungen der Atmosphäre, dem Argon, Krypton, Neon u. s. w., deren chemisch meist fehlende Eigenschaften man noch wenig kennt. Aus diesen etwa 700 natürlichen Verbindungen ist es nun mit der Zeit gelungen, einige siebzig Stoffe herzustellen, die nicht weiter zu zerlegen sind. Wir geben dieselben hier zunächst in alphabetischer Ordnung.

Tafel der chemischen Elemente.

Aluminium	Al	27,1
Antimon (Stibium)	Sb	120
Argon	A	39,9
Arsen	As	75
Barium	Ba	137,4
Beryllium	Be	9,1
Blei (Plumbum)	Pb	206,9
Bor	B	11
Brom	Br	79,96
Cadmium	Cd	112,4
Calcium	Ca	40
Cäsium	Cs	133
Cer	Ce	140
Chlor	Cl	35,45
Chrom	Cr	52,1
Decipium	Dp	171
Eisen (Ferrum)	Fe	56
Erbium	Er	166
Fluor	F	19
Gadolinium	Gd	156
Gallium	Ga	70
Germanium	Ge	72
Gold (Aurum)	Au	197,2
Helium	He	4
Indium	In	114
Iridium	Ir	193
Jod	J	126,85
Kalium	K	39,15
Kobalt	Co	59
Kohlenstoff (Carboneum)	C	12
Krypton	Kr	81,8
Kupfer (Cuprum)	Cu	63,6
Lanthan	La	138
Lithium	Li	7,03
Magnesium	Mg	24,36
Mangan	Mn	55
Molybdän	Mo	96
Natrium	Na	23,05
Neodym	Nd	143,06
Neon	Ne	20
Nickel	Ni	58,7
Niob	Nb	94
Osmium	Os	191
Palladium	Pd	106
Phosphor	P	31
Platin	Pt	194,8
Praseodym	Pr	140,5
Quecksilber (Hydrargyrum)	Hg	200,3
Rhodium	Rh	103
Rubidium	Rb	85,4
Ruthenium	Ru	101,7
Samarium	Sm	150
Sauerstoff (Oxygenium)	O	16
Scandium	Sc	44,1
Schwefel (Sulfur)	S	32,06
Selen	Se	79,1
Silber (Argentum)	Ag	107,93
Silicium	Si	28,4
Stickstoff (Nitrogenium)	N	14,04
Strontium	Sr	87,6
Tantan	Ta	183
Tellur	Te	127
Terbium	Tb	—
Thallium	Tl	204,1
Thorium	Th	232,5
Thulium	Tu	171
Titan	Ti	48,1
Uran	U	239,5
Vanadium	V	51,2
Wasserstoff (Hydrogenium)	H	1,01
Wismut (Bismutum)	Bi	208,5
Wolfram	W	184
Xenon	X	128
Ytterbium	Yb	173
Yttrium	Y	89
Zink	Zn	65,4
Zinn (Stannum)	Sn	118,5
Zirkon	Zr	90,7

Die in der zweiten Reihe neben den Namen der Elemente stehenden Buchstaben sind ihre gebräuchlichen Abkürzungen oder Symbole, deren wir uns im folgenden gleichfalls häufig bedienen. Zur einfachen und unzweideutigen Bezeichnung der aus ihnen entstehenden Verbindungen in den sogenannten chemischen Formeln sind sie unerläßlich und haben auch noch eine quantitative Bedeutung. In der dritten Reihe sind die Atomgewichte angegeben. Diese Gewichte sind bekanntlich nur Relativzahlen, da man über die wahren Gewichte der Atome nichts Sicheres weiß. Sie drücken also nur aus, wieviel schwerer nach den betreffenden Untersuchungen ein Atom des einen gegen das eines anderen Elements sein muß. Man könnte das Atomgewicht demnach auch die relative Dichtigkeit der Atome nennen, die mit der Dichtigkeit der aus ihnen bestehenden Stoffe aber keineswegs übereinstimmt. Ebenso wie wir für jene Dichtigkeit (d) eine beliebige Einheit, die des Wassers, wählten, so müssen wir für die Atomgewichte eine solche nach beliebiger, aber möglichst praktischer Übereinkunft bestimmen.

Bis vor kurzem nahm man allgemein für diese Einheit das Atomgewicht des Wasserstoffes. Auf der Tabelle aber sehen wir, daß davon abgewichen wurde, denn das Atomgewicht des Wasserstoffes ist nicht gleich Eins, sondern gleich 1,01 gesetzt. Dies erklärt sich folgendermaßen. Nachdem die Methoden der Messung sich auch für die Chemie in den letzten Jahrzehnten ungemein verschärft hatten, erkannte man, daß gerade für den Wasserstoff sich das Verhältnis, in welchem er sich mit den anderen Stoffen verbindet, und woraus das Atomgewicht abgeleitet wird, wegen praktischer Schwierigkeiten relativ weniger genau feststellen läßt, als für viele andere Elemente, z. B. den Sauerstoff. Wenn also durch neuere Untersuchungen das Atomgewicht des Wasserstoffes an sich verändert werden mußte, das in Beziehung zu den anderen immer gleich Eins gesetzt wurde, so waren auch die Atomgewichte aller anderen bekannten Stoffe danach fortwährend zu ändern. Deshalb war es vorzuziehen, das Atomgewicht eines anderen, genauer in dieser Hinsicht bekannten Stoffes als Grundlage für alle übrigen zu wählen. Dabei lag nun die andere praktische Schwierigkeit vor, daß man sich schon allgemein an die Wasserstoffeinheit gewöhnt hatte. Schließlich hat man einen Kompromiß geschlossen, indem man zwar als eigentliche Einheit das Atomgewicht des Sauerstoffes wählte, ihm aber die Zahl 16 ein für allemal gab, die er in dem alten System auch schon besaß. Damit hat man den Vorteil erreicht, daß einmal die gebräuchlichen abgerundeten Zahlen für die Atomgewichte nicht geändert werden, soweit es sich eben nicht um ganz genaue Untersuchungen handelt, und daß zweitens bei einer weiteren genaueren Feststellung des Atomgewichtes des Wasserstoffes nur dieses verändert zu werden braucht. Der Sauerstoff aber ist in dieser Hinsicht so genau untersucht, daß von seiner Seite keine allgemeinen Änderungen der Atomgewichte zu erwarten sind.

Von den in der Tafel angeführten Elementen kommt reichlich die Hälfte nur sehr selten in der Natur vor und spielt im Aufbau der Erde sowohl wie der Himmelskörper, soweit unsere Forschung reicht, eine ganz untergeordnete Rolle, so daß wir uns mit ihnen hier wenig beschäftigen werden. Es bleiben also einige dreißig Grundstoffe übrig, aus deren gegenseitigen Beziehungen sich die Welt in ihrem ganzen Umfange zusammengesetzt und entwickelt hat.

Wir unterscheiden schon nach ihrer äußeren Erscheinung unter diesen Elementen drei Hauptgruppen, die schweren Metalle, die leichten Metalle und die Nichtmetalle oder Metalloide, zu denen die früher sogenannten permanenten Gase gehören. Diese Hauptgruppen zerlegt man wieder, entsprechend der chemischen Ähnlichkeit der betreffenden Körper, in Untergruppen. Wenn auch noch andere Gruppierungen aufgestellt worden sind, die gleichfalls

Berechtigung haben, so wollen wir hier an einer früher allgemein üblichen Anordnung der Elemente mit ihren Hauptvertretern festhalten, auch auf die Gefahr hin, daß man ihr den Vorwurf, veraltet zu sein, machen könnte. Die Anordnung ist folgende:

A. Metalloide.

I. Sauerstoffgruppe mit Sauerstoff und Schwefel sowie das seltenere Selen.
II. Halogene oder Salzbildner: Chlor, Brom, Jod, Fluor.
III. Stickstoffgruppe: Stickstoff, Phosphor, Arsen, Antimon.
IV. Kohlenstoffgruppe: Kohlenstoff, Bor, Kiesel.
V. Wasserstoffgruppe mit dem Wasserstoff allein.

B. Leichte Metalle.

VI. Alkalimetalle: Kalium, Natrium.
VII. Alkalierdmetalle: Calcium, Barium, Strontium.
VIII. Magnesiumgruppe mit dem Magnesium allein.
IX. Erdmetalle mit Aluminium und einer großen Anzahl seltener Erdmetalle.

C. Schwere Metalle.

X. Eisengruppe: Chrom, Eisen, Zink, Mangan, Kobalt, Nickel, Uran.
XI. Bleigruppe: Blei, Quecksilber, Silber, Kupfer, Wismut, Kadmium.
XII. Zinngruppe: Zinn, Gold, Platin.

Diese Stoffe treten miteinander in Verbindung je nach dem Grad ihrer chemischen Verwandtschaft, die man eine Art Anziehungskraft nennen kann. Man würde also aus diesen Elementen Reihen von der Art zusammenstellen können, wie wir sie z. B. für die elektrischen Spannungen gebildet haben. Nur liegen die Verhältnisse hier verwickelter, weil nicht nur zwei, sondern eine beliebige Anzahl verschiedener Elemente miteinander in Konkurrenz treten können, sich gegenseitig vertreiben oder eigentümliche Gruppen bilden. Annähernd kann man bereits die oben gegebene Reihenfolge als eine solche chemische Spannungsreihe betrachten. Nehmen wir die Hauptgruppe der Metalloide aus, so gehen die übrigen Elemente innerhalb ihrer Gruppen überhaupt keine eigentlichen chemischen Verbindungen miteinander ein. Die schweren Metalle z. B. vereinigen sich nur zu sogenannten Legierungen, die zwar keine bloßen physikalischen Gemenge sind, aber auch nicht als chemische Verbindungen betrachtet werden können. Die einander ähnlichen Stoffe kommen allerdings in der Natur sehr häufig nebeneinander vor, wie z. B. Eisen, Kobalt und Nickel, verhalten sich aber gegeneinander ziemlich indifferent. Bei den leichteren Stoffen, besonders den Gasen, finden dagegen vielfach Verbindungen der hier nebeneinander angeführten Glieder statt, so zwischen Sauerstoff und Schwefel.

a) Oxyde.

In dem gesamten Gebiete der toten Natur spielen die Sauerstoffverbindungen die hauptsächlichste Rolle. Fast die ganze Erdrinde, soweit wir sie kennen, besteht aus solchen Stoffen, aus Oxydations- oder Verbrennungsprodukten, wie wir die Verbindungen aller anderen Elemente mit dem Sauerstoff nennen, wenn auch das vulgäre Merkmal der Verbrennung, die Flamme, in den seltensten Fällen dabei auftritt. Dagegen entsteht bei jeder solchen Verbindung Wärme.

Die verbreitetste Sauerstoffverbindung ist das **Wasser**. Mischt man einen Raumteil, also etwa ein Liter, Sauerstoff mit zwei Raumteilen Wasserstoff, so beobachtet man zunächst keine Veränderung an den beiden Gasen; sie bilden nur ein physikalisches Gemisch. Sobald man aber nur einen ganz geringen Teil desselben auf eine gewisse Temperatur bringt, etwa durch einen kleinen elektrischen Funken oder durch eine Flamme, so tritt unter heftigem Knall (Explosion) die chemische Reaktion ein, deren Produkt Wasserdampf ist, aus dem sich bei entsprechender Temperaturerniedrigung tropfbares Wasser niederschlägt. Dieses Produkt hat sowohl in physikalischer wie in chemischer Beziehung ganz andere Eigenschaften als seine beiden Komponenten.

Sauerstoff, O, ist ein farb- und geruchloses Gas, das zwar selbst nicht brennbar ist, aber die Verbrennung anderer Stoffe veranlaßt und die Atmung und damit das Leben aller Geschöpfe unterhält. Ein Liter dieses Gases wiegt 1,43 g. Früher wurde der Sauerstoff für ein permanentes Gas gehalten, doch hat man in neuerer Zeit gefunden, daß es bei —181° siedet, also bei niedrigeren Temperaturen und gewöhnlichem Atmosphärendruck eine Flüssigkeit ist, die wohl wie Wasser aussieht, aber mit demselben sonst keine Ähnlichkeit hat. Bei welcher Temperatur der Sauerstoff fest wird, ist nicht bekannt.

Wasserstoff, H, ist ebenfalls ein farbloses und geruchloses Gas. Im Gegensatze zum Sauerstoff aber läßt er sich an der Luft entzünden und brennt mit schwach bläulicher Flamme; das Produkt ist wieder Wasser. Dagegen unterhält er selbst die Verbrennung nicht. Ein glimmender Holzspan, der, in Sauerstoff getaucht, in heller Flamme auflodert, erlischt in Wasserstoff. Er ist der leichteste aller Stoffe, ein Liter wiegt nur 0,090 g, oder genau 16mal weniger als Sauerstoff, entsprechend seinem ebensoviel geringeren Atomgewicht. Wasserstoff siedet unter gewöhnlichem Drucke bei —246°, seine kritische Temperatur, bei welcher eine Verflüssigung unter einem Drucke von 20 Atmosphären stattfindet, liegt bei —234°.

Die Eigenschaften des Wassers sind bekannt. Es ist im Gegensatze zu seinen chemischen Komponenten leicht in alle drei Aggregatzustände zu versetzen und brennt weder, noch unterhält es die Verbrennung.

Es ist das charakteristische Merkmal jeder chemischen Vereinigung, daß ihr Produkt einen scheinbar ganz neuen Stoff schafft, der mit seinen Komponenten im ganzen Verhalten nichts Gemeinsames hat. Durch die Verbindung sind gewissermaßen entgegengesetzte Eigenschaften der Elemente ausgeglichen, unwirksam gemacht, wie etwa bei der Vereinigung von negativer und positiver Elektrizität.

Eine weitere Eigenschaft der chemischen Verbindungen ist die, daß sie je nach dem Verwandtschaftsgrade der beteiligten Stoffe zueinander meist schwerer zu lösen als herzustellen sind. In unserem Beispiel vermögen nur sehr hohe Wärmegrade und die Elektrizität, die in den meisten Fällen eine stärkere Trennungskraft hat, wie die chemischen Reaktionen, und höhere Wärmegrade erzeugt, die beiden im Wasser vereinigten Elemente wieder auseinander zu reißen. Wir haben dies schon bei unserem Voltameterversuch auf S. 385 beobachtet, und wir sahen dabei, wie an der einen Elektrode sich genau wieder zwei Raumteile Wasserstoff und an der anderen ein Teil Sauerstoff ausschieden.

Allerdings gibt es verschiedene Reaktionen, welche den Wasserstoff allein aus dem Wasser freimachen. Wirft man ein Stück **Natrium** auf Wasser, so entzündet es sich unter heftigen Bewegungen und verbrennt (s. die Abbildung, S. 429), denn es hat größere Verwandtschaft zum Sauerstoff als der Wasserstoff, reißt ihn an sich und bildet mit ihm eine Sauerstoffverbindung. Der Wasserstoff wird durch die entwickelte Hitze entzündet und verbrennt seinerseits an

der Luft wieder zu Wasser. Man kann dies indes durch geeignete Mittel verhindern, indem man die Luft von dem Prozeß abschließt, und erhält dann den Wasserstoff wieder als Gas.

Eine andere überall beobachtete Eigenschaft der chemischen Verbindungen ist die, daß die einfachen Stoffe nur in ganz bestimmten einfachen Raumverhältnissen zusammentreten. Wir sahen, daß genau zwei Teile Wasserstoff und ein Teil Sauerstoff zu Wasser sich vereinigen oder aus demselben wieder zu erhalten sind. Würde man das Gemenge beider Gase, das Knallgas, in anderen Verhältnissen herstellen, so würde bei der Verbindung immer eine entsprechende Menge des einen Gases unverbunden bleiben, oder es würde unter Umständen überhaupt keine Reaktion stattfinden. Die Messung dieser Teile nach ihrem Gewicht ergibt, daß 16 Gewichtsteile Sauerstoff mit 2 Gewichtsteilen Wasserstoff zu Wasser zusammentreten. Nach unseren Angaben auf der vorangehenden Seite wiegt 1 Liter Sauerstoff 1,43 g und 2 Liter Wasserstoff 0,18 g. Da diese beiden Zahlen sich wie 16 zu 2 verhalten, wiegen die 3 Liter Knallgas also 1,61 g. Ebensoviel wiegt das daraus entstehende Wasser, denn es ist bei dem chemischen Prozesse ja nichts anderes dazu noch etwas von dem Gemisch weggekommen. Die genauesten Untersuchungen bestätigen dies. 1,61 g Wasser nehmen genau 1,61 cm^3 bei $+4^{\circ}$ ein, das ist fast 2000mal weniger als vorher das Gemenge. Wir können hieraus die explosive Kraft jener plötzlichen Zusammenziehung der Materie auf einen soviel kleineren Raum begreifen, wenn auch die Erscheinung der Explosion nicht auf einfache Weise zu stande kommt, weil die Wärmeentwickelung dabei hauptsächlich wirksam ist.


Natriumoxydation im Wasser. Vgl. Text, S. 428.

Aus der Tafel der Atomgewichte, S. 425, ersehen wir, daß das gefundene Verhältnis des Sauerstoffes zum Wasserstoff im Wasser dem einfachen Atomgewicht des ersten zum doppelten des zweiten Gases entspricht. Es verbindet sich also ein Atom Sauerstoff mit zwei Atomen Wasserstoff zu Wasser. Wir drücken dies durch das Symbol H_2O aus, welches wir in der Folge zu verwenden haben, um das chemische Produkt Wasser in einer Formel zu fixieren.

Im folgenden gehen wir gleich zu Verbindungen des Sauerstoffes mit den leichten Metallen über, von denen wir vorhin schon die mit dem Natrium kennen lernten. Wir finden, daß in dem Wasser, auf welchem das Natrium verbrannte, ein Stoff aufgelöst ist, der aus je einem Atomgewichtsteil des verzehrten Natriums und weiter aus Sauerstoff und Wasserstoff besteht. Die Reaktion geht nach der Formel: $Na + H_2O = NaOH + H$ vor sich. Es entsteht das sogenannte Natriumhydroxyd (Ätznatron), dessen Namen (hydor griech. = Wasser) schon den Mehrgehalt des Wasserstoffes anzeigt. Mit Kalium kommen wir zu genau demselben Resultat und erhalten Kaliumhydroxyd KOH. Immer verbinden sich zwei Atome der anderen Stoffe mit einem Teil Sauerstoff, und es gelingt nicht, eine Verbindung herzustellen, in welcher weniger als dieser Teil Sauerstoff mit zwei Teilen Kalium oder Natrium zusammentritt.

Dagegen kann man z. B. gleiche Teile von Kalium oder Natrium und von Sauerstoff mit einem weiteren Teil Sauerstoff zu neuen Verbindungen vereinigen. Es entsteht dann das Kalium- oder Natriumsuperoxyd, so genannt, weil eben mehr Sauerstoff in ihnen enthalten ist als in den entsprechenden Oxyden. Zwischenliegende Mischungsverhältnisse, die sich nicht in ganzen Zahlen für die zusammentretenden Atome ausdrücken lassen, gibt es nicht. Aber unter gewissen noch näher zu erörternden Gesetzmäßigkeiten können noch mehr Atome Sauerstoff zu

einer unveränderten Atomzahl der anderen Elemente treten. Es erscheint dabei die Eigentümlichkeit, daß ein Atom Sauerstoff sich immer nur mit zwei Atomen bestimmter Elemente verbindet, die der Wasserstoff-, der Halogen- und der Kaliumgruppe angehören. Dabei kann es aber auch eintreten, daß zwei Atome Sauerstoff sich zunächst teilweise aneinanderbinden.

Man hat, um sich ein übersichtliches Bild von diesen Verhältnissen zu machen, das aber durchaus keine Abbildung der wirklichen Verhältnisse in den molekularen Welten zu sein braucht, den Begriff der Valenzen oder Wertigkeiten eingeführt. Danach hat der Sauerstoff zwei Valenzen, ist zweiwertig. Das heißt, er muß sich, um ein beständiges chemisches Produkt hervorzubringen, oder, anders ausgedrückt, um aus den Atomen der sich mit ihm verbindenden Elemente Moleküle schaffen zu können, deren innere Kräfte im Gleichgewichte sind, mit je zwei anderen Valenzen vereinigen, wobei aber auch die seiner eigenen Atome verwendet werden können. Man drückt dies durch das Symbol -O- aus. Das Sauerstoffatom hat also zwei Stellen, an denen es sich mit anderen Elementen verbinden kann, und deren Verbindungskraft möglichst befriedigt werden muß. Besteht z. B. der Sauerstoff allein, so binden sich je zwei seiner Atome zu einem Molekül aneinander, was wir symbolisch durch O=O ausdrücken. Man sagt, die Valenzen müssen gesättigt werden, und spricht, wenn dies eintrifft, von gesättigten Verbindungen im Gegensatz zu ungesättigten Verbindungen, die unbeständiger sind.

Eine chemische Formel, wie die zuletzt ausgeführte, ist eine Strukturformel, weil sie etwas über den Aufbau des Moleküls aussagt. Die angeführten Gruppen, der Wasserstoff, die Salzbildner und die Alkalimetalle, sind einwertig. Das Wasserstoffmolekül hat demnach die Strukturformel H-H, das Kalium K-K. Die Strukturformel des Wassers ist ferner H-O-H, die des Kaliumoxyds K-O-K. Von dem Symbol für das Sauerstoffatom gehen immer zwei Striche, von jedem Kaliumatom nur einer aus; alle Valenzen sind demnach gesättigt.

Alle Verbindungen mit dem Sauerstoff, bei dem seine Valenzen mit je einem Atom des hinzukommenden Stoffes gesättigt sind, heißen Oxyde. Es gibt nun auch Verbindungen, bei denen noch ein Atom Sauerstoff mehr hinzutritt, das sich also teilweise wieder mit Sauerstoff sättigen muß, so daß in der Strukturformel die Mitte -O-O- lautet. Diese Verbindungen heißen Superoxyde. So ist die Strukturformel des Kaliumsuperoxyds K-O-O-K, und man schreibt es deshalb nicht KO, sondern K_2O_2. Dies hat für alle Superoxyde Geltung. Dann gibt es noch entsprechend Trioxyde, Tetroxyde, Pentoxyde und so fort, je nach der wachsenden Anzahl von hinzutretenden Sauerstoffatomen. Treten weniger Sauerstoffatome in die Verbindung, als es bei den gewöhnlichen Oxyden der Fall ist, so nennt man sie Oxydule. Die mit dem Sauerstoff (und auch mit anderen Elementen) zusammentretende Atomgruppe, die durchaus nicht immer aus bloß einem Elemente besteht, bezeichnet man allgemein als das Radikal und gibt ihr den Buchstaben R.

Es hat sich nun gezeigt, daß die den einzelnen Gruppen angehörigen Elemente unter sich alle gleiche Wertigkeit haben und nur wenige Stoffe eine Ausnahme machen. Der Wasserstoff, die Halogen- und die Kaliumgruppe sind einwertig, die Sauerstoff-, Calcium-, Magnesium- und Bleigruppe zweiwertig, die Aluminium- und Eisengruppe zwei- bis dreiwertig, die Kohlenstoff- und Zinngruppe vierwertig und endlich die Stickstoffgruppe fünfwertig. Höhere Wertigkeiten gibt es nicht.

Wir haben diese Beziehungen hier gleich kurz angeführt, weil sie uns den folgenden Überblick erleichtern, der nötig ist, ehe wir uns mit den Fragen nach dem tieferen Zusammenhang dieser neuen Erscheinungsgruppe mit den bereits bekannten beschäftigen können.

Die wenigen bisher erkannten Regeln für die chemischen Verbindungen setzen uns bereits in den Stand, solche Verbindungen theoretisch auf dem Papier vorherzusagen, weil wir annehmen dürfen, daß die möglichen Kombinationen leicht zusammentretender Elemente auch in der Natur vorhanden sind, oder doch von uns künstlich hergestellt werden können. Nehmen wir z. B. die beiden ersten Elemente, Sauerstoff und Wasserstoff: Ihre Verbindung H_2O, das Wasser, ist nach den vorangehenden Regeln in strenger chemischer Terminologie Wasserstoffoxyd zu nennen. Es ist aber auch die Verbindung H_2O_2, also Wasserstoffsuperoxyd, denkbar mit der Strukturformel H–O–O–H, in der alle Wertigkeiten gesättigt sind. Diese Substanz ist in der Tat hergestellt worden. Es ist gleichfalls eine wasserklare Flüssigkeit, hat aber sonst ganz andere Eigenschaften als das Wasser, die wir zum Teil schon aus seiner Strukturformel herauslesen können. Schon früher wurde gesagt, daß diejenigen Stoffe sich am liebsten miteinander verbinden, die größere chemische Anziehungskraft, Verwandtschaft zueinander haben, die z. B. in den oben angegebenen Gruppen weit voneinander stehen. Danach verstehen wir, daß zwei Atome des gleichen Stoffes sich oft mit sehr geringer Kraft festhalten. In der Formel H–O–O–H halten sich in der Mitte die beiden Sauerstoffatome nur aneinander fest. Demnach wird eins davon leicht herausfallen, wenn es sich mit einem anderen Stoffe verbinden kann. Das Wasserstoffsuperoxyd muß also, wie im allgemeinen jedes Superoxyd, seinerseits die Oxydation der mit ihm in Berührung kommenden Stoffe unterstützen. Dies ist wirklich der Fall. Da nach dem Austritt jenes Sauerstoffatoms aus dieser Verbindung H_2O_2 noch H_2O, d. h. Wasser, übrigbleibt, so kann das Wasserstoffsuperoxyd vorteilhaft zum Bleichen von organischen Stoffen verwendet werden. Denn die zu entfernenden Farbstoffe verbinden sich mit dem austretenden Sauerstoffatom zu einem Oxyd, das entfernt werden kann, während das vom Bleichmittel übrigbleibende Wasser nicht schädlich angreift, was von anderen Bleichmitteln, wie z. B. den Chlorverbindungen, nicht gesagt werden kann.

Wir führen hier gleich noch ein anderes typisches Beispiel von möglichen Atomverbindungen an, das der Atomringe. Nicht nur zwei, sondern auch drei Sauerstoffatome können miteinander zu einem gesättigten Molekül verbunden werden. Die Strukturformel sieht dann folgendermaßen aus: O
O–O. Der dieser Formel entsprechende Stoff ist gleichfalls in der Natur vorhanden; es ist der sogenannte aktive Sauerstoff oder das Ozon O_3, das bei Gewittern sowie bei starken, künstlich erzeugten elektrischen Entladungen häufig auftritt und sich durch seinen eigentümlichen, an Phosphor erinnernden Geruch bemerkbar macht. Man muß annehmen, daß bei diesen sehr kräftigen Einwirkungen eine Anzahl doppelter Sauerstoffatome in einzelne gespalten werden, die sich sofort wieder mit den doppelt gebliebenen vereinigen. Aus dem Vorangehenden begreifen wir, daß diese Verbindung sehr unbeständig sein muß. Sie kann sich sogar langsam von selbst wieder in gewöhnlichen Sauerstoff verwandeln, indem zwei Moleküle Ozon zu drei Molekülen Sauerstoff zusammentreten. Ozon wirkt noch in weit höherem Maß oxydierend als Sauerstoff und zersetzt deshalb organische Stoffe, indem es ihre Verbindungen auseinanderreißt und mit den übrigbleibenden Radikalen neue Oxyde bildet. Deshalb reinigt er die Luft von Mikroorganismen, die meist für uns schädlich sind, und wirkt in dieser Hinsicht gesundheitfördernd, aber weniger bei seiner direkten Einatmung. Die Luft hat immer einen gewissen Ozongehalt, der, wie man beobachtet hat, außerhalb der Städte oder anderer Plätze, wo Krankheitskeime erzeugt werden, größer ist, weil durch die Vernichtung der Keime das Ozon selbst absorbiert wird. Die Dichtigkeit des Ozons verhält sich zu der des gewöhnlichen Sauerstoffes wie 3 zu 2, entsprechend den zusammentretenden Atomen.

Es gibt noch andere Elemente, die solche *allotropen Modifikationen* zeigen, wie man diese verschiedenen Formen nennt, die ein und dasselbe Element oder auch dieselbe Verbindung innerhalb des gleichen Aggregatzustandes aufweisen können. Wir sehen jedenfalls aus dem oft sehr verschiedenen Verhalten solcher an sich gleichen, nur im Molekül verschieden aufgebauter Stoffe, daß es, wenigstens in diesem Falle, nur die Gruppierung der Atome ist, welche ihre Eigenschaften bedingt, und nicht eine innere Verschiedenheit. Erst später erfahren wir, inwieweit wir diesen, unserer Grundanschauung vom Wesen der Naturwirkungen entsprechenden Satz verallgemeinern können.

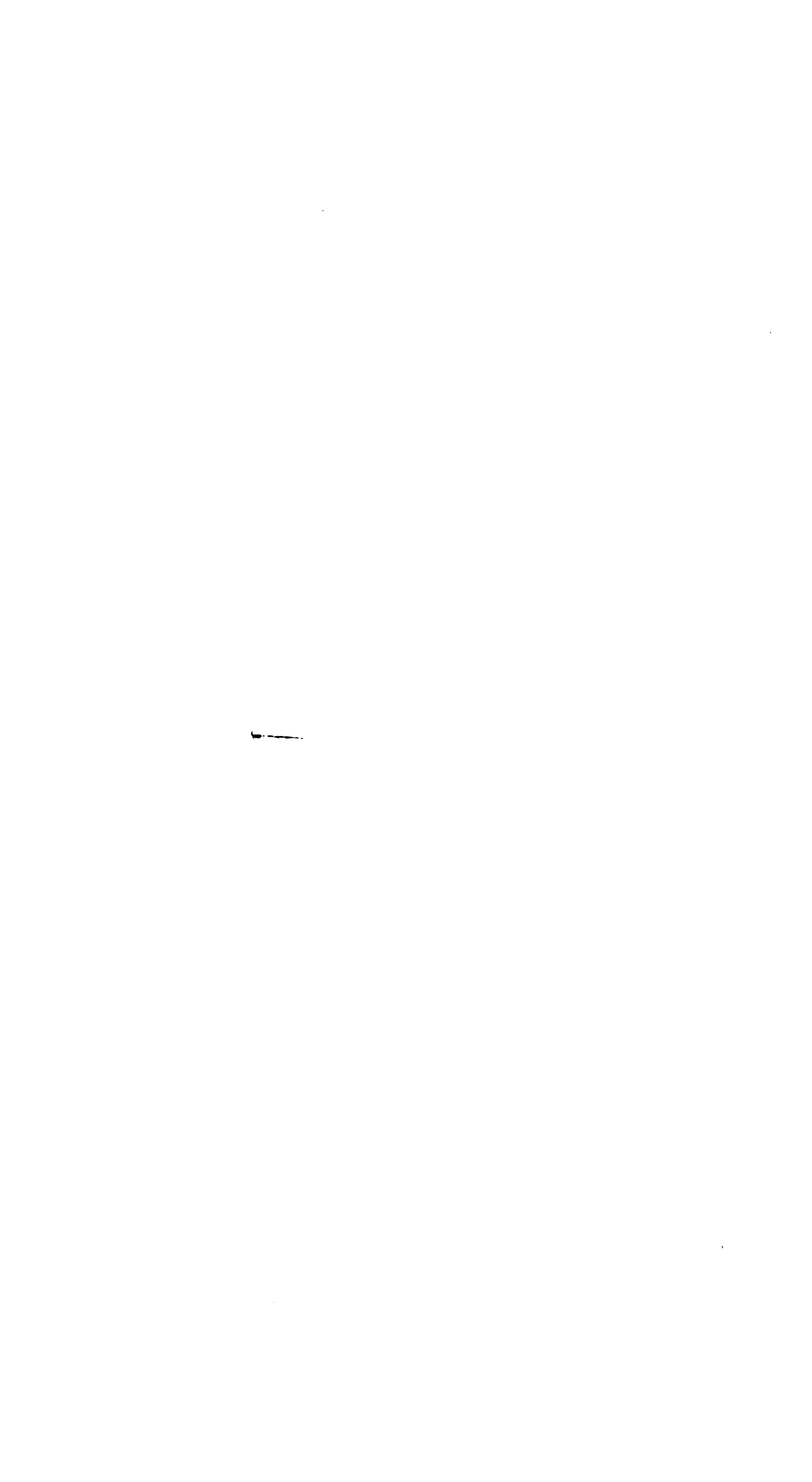
Unter den sehr zahlreichen bekannten Oxyden seien nur einige genannt, die entweder im folgenden ein besonderes Interesse gewinnen oder allgemeiner bekannt sind. Auf irgendwelche Vollständigkeit kann der vorliegende Überblick keinen Anspruch machen.

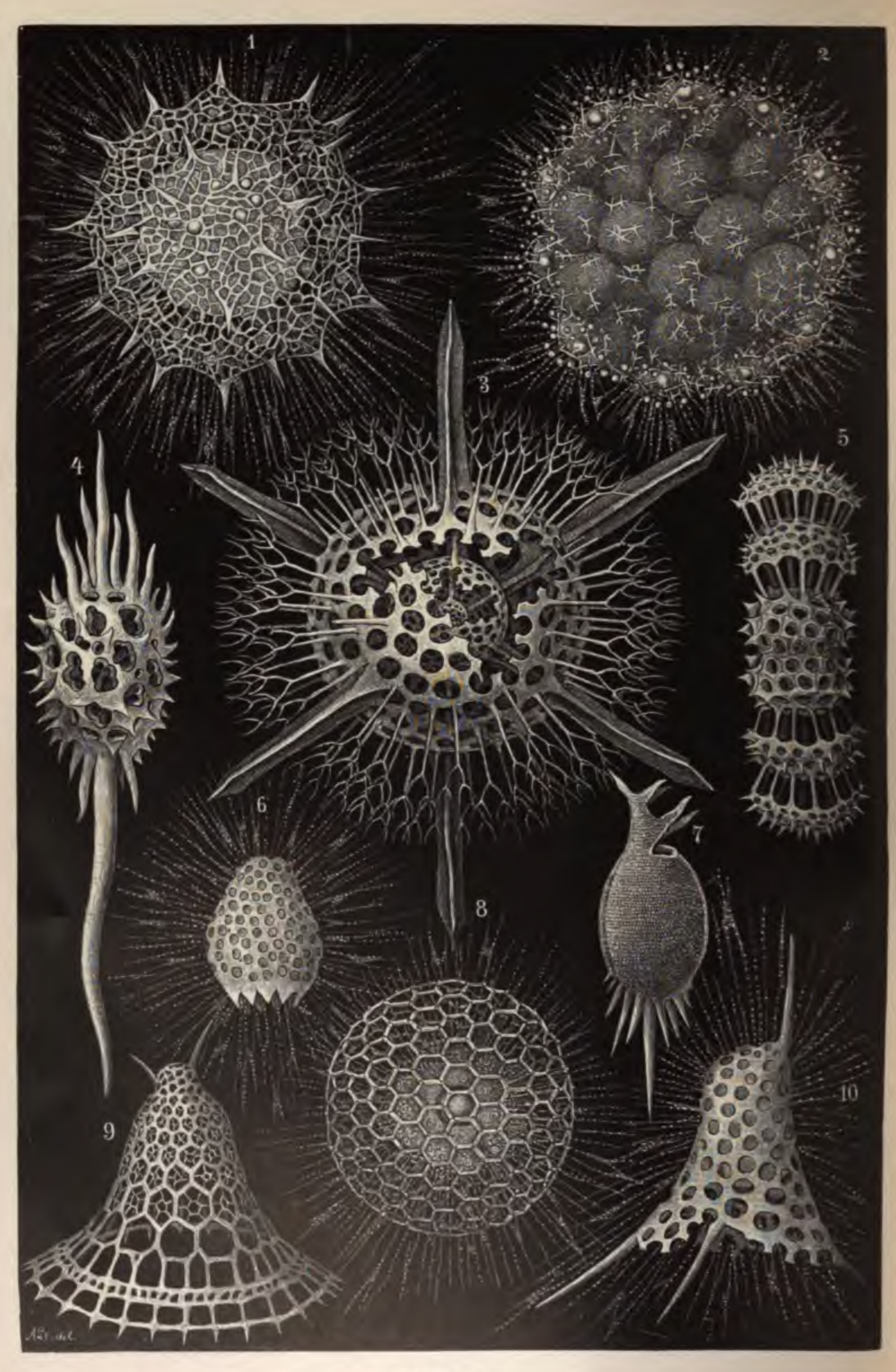
Der Sauerstoff verbindet sich auch mit dem ihm ähnlichen, also chemisch wenig verwandten *Schwefel*. SO_2, Schwefeldioxyd, ist als wasserfreie *schweflige Säure*, SO_3, Schwefeltrioxyd, als gleichfalls wasserfreie *Schwefelsäure* bekannt. Diese ist ein fester Körper, der seidenglänzende Kristallnadeln bildet und ungemein leicht an der Luft verdunstet, indem er ihren Wassergehalt an sich reißt. Man nennt einen solchen Stoff *hygroskopisch*. Mit dem Wasser geht dieses SO_3 eine weitere Verbindung ein: es wird aus $SO_3 + H_2O$ ein neuer flüssiger Stoff H_2SO_4, oder aus dem *Schwefelsäureanhydrid* die *eigentliche Schwefelsäure*, wie wir sie als Flüssigkeit kennen. Daß hierbei nicht nur eine bloße Auflösung der festen Schwefelsäure in Wasser entsteht, beweist zunächst der Umstand, daß bei dieser Verbindung eine sehr starke Wärmeentwickelung beobachtet wird, und zweitens, daß man durch bloßes Verdampfen das Schwefelsäureanhydrid nicht wieder von dem Wasser befreien kann. In der flüssigen Schwefelsäure haben wir bereits eine dreifache Verbindung vor uns, deren Strukturformel $S\begin{smallmatrix}=O-O-H\\ -O-O-H\end{smallmatrix}$ ist.

Als *Säuren* pflegen wir gewisse höhere Oxyde zu bezeichnen, die gern von ihrem Reichtum an Sauerstoff abgeben und aus diesem Grunde besonders leicht andere Oxyde bilden. So lösen sich gewisse Metalle in Schwefelsäure, indem sie sich zunächst in die betreffenden Metalloxyde verwandeln. Alle leichten Metalle und die der Eisengruppe sind in Schwefelsäure löslich, die der Blei- und Zinngruppe dagegen nicht. Blei, Silber, Zinn, Gold, Platin werden also von Schwefelsäure nicht angegriffen.

Eine noch kräftigere Säure entsteht durch die Verbindung des Sauerstoffes mit dem dreiwertigen Stickstoff, die *Salpetersäure*, N_2O_5. Auch sie existiert flüssig nur als *Hydrat*, d. h. in chemischer Verbindung mit Wasser, und hat alsdann die Formel $N_2O_5 + H_2O = 2HNO_3$ oder, in der Strukturformel ausgedrückt, $2 \times H-O-N\equiv\genfrac{}{}{0pt}{}{O}{O}$. Die Salpetersäure greift alle Metalle mit Ausnahme der der Zinngruppe an (wobei übrigens Zinn selbst eine Übergangsstellung einnimmt), also auch Silber, aber nicht Gold, und wird, weil sie Gemische dieser beiden edlen Metalle voneinander trennt, auch *Scheidewasser* genannt. Die *salpetrige Säure*, N_2O_3, hat, abgesehen von den Gewichtsverhältnissen, genau dieselbe Zusammensetzung wie unsere atmosphärische, von allen sonstigen Beimengungen befreite Luft. Diese Untersäure bildet sich deshalb in geringen Mengen bei den heftigen Erschütterungen, die die Gewitterentladungen hervorbringen, gleichzeitig mit dem Ozon. Als ein Fäulnisprodukt der stickstoffhaltigen tierischen Substanzen bildet sich Salpetersäure und weiter nach Verdrängung eines Teils Wasserstoff durch Natrium oder Kalium der *Salpeter*, der auch als Mineral in dem Chilisalpeter ($NaNO_3$) vorkommt.

Auch die anderen Elemente der Stickstoffgruppe, Phosphor, Arsen u. s. w., bilden neben den anderen Oxyden Säuren.





Radiolarien.

1. Rhizosphaera leptomita. — 2. Sphaerozoum Ovodimare. — 3. Actinomma drymodes. — 4. Lithomespilus flammabundus. — 5. Ommatocampe nereides. — 6. Carpocanium Diadema. — 7. Challengeron Willemoesii. — 8. Heliosphaera inermis. — 9. Clathrocyclas Ionis. — 10. Dictyophimus Tripus.

Aus der vierwertigen Kohlenstoffgruppe nennen wir das Kohlenoxyd CO, jenes bekannte giftige Gas, das bei ungenügender Verbrennung der Kohlen entsteht, so daß sich nur ein Atom des zweiwertigen Sauerstoffes mit einem des vierwertigen Kohlenstoffes verbinden kann. Von der Bedeutung der Kohlensäure im Haushalte der Natur wird noch vielfach die Rede sein.

Der Kohlenstoffgruppe gehört auch das Silicium, Kiesel an, das sich, trotz seines so gänzlich verschiedenen Äußeren, chemisch ganz ähnlich verhält wie der Kohlenstoff. Die Verbindung SiO_2 nennen wir Kieselsäure, obgleich sie ein fester, ohne weiteres gegen alle chemischen Angriffe indifferenter Körper, eben ein Kieselstein ist. Es ist sehr merkwürdig und regt zu interessanten Gedankenreihen über die verschiedenen Möglichkeiten der Weltentwickelung an, wenn wir sehen, daß hier eine außerordentlich schwer schmelzbare Verbindung mit einer



Der Riesendamm aus Basaltsäulen an der Küste von Nordirland. Vgl. Text, S. 434.

beständig flüchtigen die gleichen Eigenschaften hat, und erwägen, daß der Grundstoff der einen Verbindung, der Kohlenstoff, die ganze Mannigfaltigkeit der organischen Welt durch seine unendliche Kombinationsfähigkeit hervorgezaubert hat, während die Siliciumverbindungen innerhalb der toten Natur eine durchaus entsprechende Rolle als Bildner der Erdrinde und von Hunderten verschiedener Mineralien spielt. Man könnte sich vorstellen, daß das Silicium in einer Welt, deren mittlere Temperatur einige tausend Grad höher liegt als die der unsrigen, einer anderen organischen Entwickelung zur körperlichen Grundlage gedient hat, wie es in unserer Welt der Kohlenstoff tut. Auch unsere Organismen bedienen sich vielfach des Siliciums, freilich nur, um schützende Panzer zu bilden, wie die mikroskopischen Geschöpfe, die Radiolarien, welche zu Tausenden in jedem Tropfen Meerwasser leben und einen Hauptbestandteil des Plankton, der im Meer treibenden Lebewesen, bilden. Die beifolgende Tafel bringt einige dieser zierlichen Gehäuse zur Darstellung. Auch die Schwämme bilden ihr Skelett aus Kiesel, und die Pflanzen, z. B. die Schachtelhalme, bedienen sich dieses Stoffes zuweilen, um sich mehr Festigkeit zu geben. Die beständig aus dem Meer niederregnenden Kieselpanzer der abgestorbenen

Diatomeen bilden fast ausschließlich den Meeresschlamm, die neuste „organogene“ Gesteinsablagerung, vergleichbar den Kreideablagerungen der Tertiärperiode, und auch das Erdreich besteht oft aus solcher Diatomeenerde (Kieselgur), auf welcher ein großer Teil von Berlin ruht.

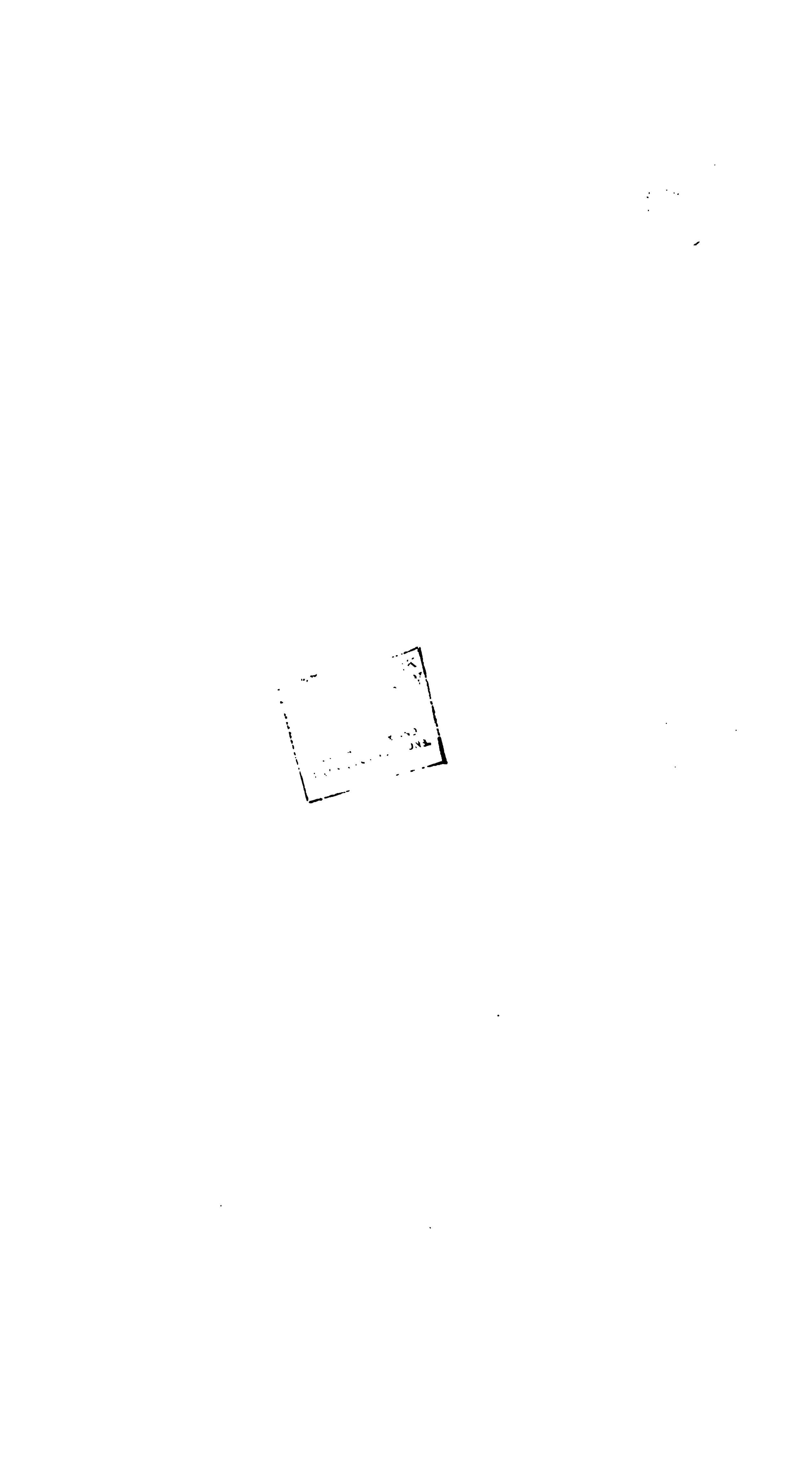
In der toten Natur hat die Kieselsäure in Verbindung mit vielen anderen Stoffen die schönsten und nach dem Diamant, dem kristallisierten Kohlenstoff, die edelsten Steine sowie die große Menge der gewöhnlichen Gesteine gebildet. Einige dieser Silikate seien hier erwähnt.

Das die kristallinisch feste Grundlage aller übrigen Gesteine bildende Urgestein ist der Granit, der zum großen Teil aus Quarz, aus freier Kieselsäure, besteht; Verbindungen von Kiesel und Magnesium sind der Serpentin, der Talkstein, der Meerschaum; im Olivin ist ein Magnesiumsilikat mit einem Eisensilikat gemischt. Der Augit ist eine Calcium-Magnesium-Kieselverbindung. Der edle Topas besteht aus Aluminium, Eisen und Kiesel, der Smaragd aus Aluminium, Beryllium und Kiesel. Die Feldspate sind Aluminiumsilikate, die außerdem noch Kali, Natron oder Kalk enthalten; die Porzellanerde ist durch Verwittern des kristallinischen Feldspats entstanden. Auch der Basalt, der zuweilen wie von Menschenhand geschlagene Säulen zu bilden vermag (s. die Abbildung, S. 433), gehört zu diesen Silikaten. Der berühmte Lapislazuli ist ein Aluminiumnatriumsilikat, das nebenbei noch Schwefel enthält. Auch der Granat ist ein Aluminium-(Tonerde-)silikat, welches Eisen oder Mangan und Calcium enthält. Der Turmalin, der uns schon vielfach beschäftigt hat, ist ein Borosilikat, auch gibt es Zink-, Kupfer-, Wismut- u. s. w. Silikate. Weitere Silikate sind der Achat, Jaspis, Onyx, Heliotrop, Opal, Amethyst, ebenso der Feuerstein. Eine Reihe dieser edlen Silikate zeigt die hier beigeheftete farbige Tafel „Edelsteine“. Viele Versteinerungen, welche uns die vorweltlichen Tier- und Pflanzenformen aufbewahrt haben, sind Verkieselungen, und ebenso bilden sich an vielen Geisern (s. die Abbildung, S. 170) starke Kieselablagerungen.

Ein künstliches Silikat ist das für die gesamte Naturforschung so wichtige Glas. Ein Teil dieser Verbindung ist das sogenannte Wasserglas, das seinen Namen daher hat, daß es in Wasser löslich ist und in dieser Form zu anderen chemischen Reaktionen befähigt wird. Wasserglas entsteht durch Zusammenschmelzen von Kieselsäure (Sand) mit Pottasche oder Soda (Kali oder Natron). Diese leicht lösliche Substanz verbindet sich in der Schmelzhitze mit Kalk, Tonerde oder mit Metalloxyden zu dem fast von keiner chemischen Einwirkung beeinflußten Glase. Demnach gibt es Aluminiumglas, Eisenglas, Kupferglas, Bleiglas, Uranglas, Goldglas u. s. f. Auch alle Säuren, denen zum Teil selbst die edeln Metalle Gold und Platin nicht widerstehen, lassen es unzersetzt, mit alleiniger Ausnahme der Fluorwasserstoffsäure (Flußsäure). Die metallischen Bestandteile geben dem Glase die verschiedenen optischen Eigenschaften und Färbungen. Ein Natriumcalciumsilikat ist das gewöhnliche Glas, das zu den bekannten Glaswaren, zu Fensterscheiben u. s. w. verwendet wird und verhältnismäßig leicht schmelzbar ist. Das optisch verwendete Kronglas ist ein Kaliumcalciumsilikat; das schwere Flintglas, das mit dem Kronglas zusammen sich am besten zur Herstellung achromatischer Linsen eignet, ist ein Kaliumbleisilikat, in welchem mehr oder weniger beigemischtes Calcium die optischen Eigenschaften noch weiter zu variieren vermag. Die unter anderen aus Glas hergestellten künstlichen Edelsteine haben also im wesentlichen dieselbe Zusammensetzung wie die echten; nur sind wir leider nicht im stande, den hergestellten Glasfluß zu einer Kristallisation zu veranlassen, wie sie in der Natur unter noch unbekannten Verhältnissen stattfindet, weshalb die künstlichen Edelsteine auch nicht dieselbe Härte wie die natürlichen haben. Gleiches gilt bekanntlich von dem kristallisierten Kohlenstoff, dem Diamanten, der, aus wertlosem Material bestehend, nur durch die



1. Edler Opal. — 2. Edler Chrysolith. — 3. Edler Granat. — 4. Chrysoberyll. — 5. Edler Spinell. — 6. Pyrop (böhmischer Granat). — 7. Edler Beryll (sibirischer Aquamarin). — 8. Brasilischer Topas. — 9. Smaragd. — 10. Orientalischer Rubin. — 11. Orientalischer Saphir. — 12. Topas. — 13. Turmalin (Rubellit). — 14. Diamant. — 15. Smaragd. — 16. Beryll. — 17. Saphir. — 18. Rubin. — 19. Granat (Kaneelstein). — 20. Onyx. — 21. Amethyst-Druse. — 22. Achat. — 23. Türkis.



geheimnisvolle Kraft so kostbar wird, die seine Moleküle zu jenen wunderbar regelmäßigen Formen zusammenfügt.

Wirkliches Glas kommt auch in der Natur vor, und zwar gelegentlich in ganz großartiger Entfaltung. Unsere untenstehende Abbildung zeigt die wunderbaren Obsidianfelsen im Yellowstonepark (Felsengebirge), an denen der Lavaglasfluß zu herrlichen schwarzglänzenden fünfkantigen Säulen, genau den Basaltsäulen gleich, auskristallisiert ist. Der Weg, welcher an diesen Felsen aus schwarzem Glas vorbeiführt, ist ganz mit scharfen Splittern bedeckt, welche früher die Indianer benutzten, um daraus Pfeilspitzen und Messer zu machen. Obsidian ist ein Aluminium- und Eisenglas.



Obsidianfelsen im Yellowstonepark, Nordamerika. Nach Photographie.

Von den Oxyden der leichten Metalle haben wir schon wiederholt gesprochen. Wir kennen das Kali und Natron, K_2O und Na_2O. MgO ist die bekannte Magnesiaerde, die Soda ist ein Karbonat des Natriumoxyds, $NaCO_3$, chemisch gebunden mit Wasser, $CaCO_3$ der Kalk, der in großen Ablagerungen in der Erdrinde vorkommt. Kalk ist in gewöhnlichem Wasser nicht löslich, wohl aber in kohlensäurehaltigem. Da die meisten Gebirgswässer wenigstens kleine, viele ziemlich bedeutende Mengen Kohlensäure enthalten, so löst sich in ihren unterirdischen Läufen der Kalk auf; das auf diese Weise kalkhaltig gewordene Wasser bezeichnet man im gewöhnlichen Leben als hartes Wasser, das durch Auskochen weich gemacht werden kann, weil dadurch die Kohlensäure und mit ihr der Kalk entfernt wird. Stark kohlensäurehaltige Mineralwässer verlieren ihren Überschuß an diesem Gas bereits bei ihrem Austritt ins Freie und setzen dabei den Kalk ab. Auf diese Weise erklären sich die Überkrustungen z. B. im Karlsbader Sprudel und die Entstehung der Tropfsteinhöhlen, von denen die Abbildung auf S. 436 eine zeigt. Der Kalkspat, der uns wegen seiner eigentümlichen doppelbrechenden Eigenschaften bereits interessiert hat, ist ein Calciumkarbonat, $CaCO_3$; er ist die kristallinische Form des Marmors,

der die gleiche chemische Zusammensetzung hat, ebenso der **Kreide**, welche bekanntlich aus den Panzern mikroskopischer Geschöpfe besteht. Der **Dolomitenkalk** ist ein Calcium-Magnesium-Karbonat, $CaMgCO_3$. Von der **Tonerde**, Aluminiumoxyd, Al_2O_3, haben wir schon wiederholt



Tropfsteinhöhle bei Aggtelek in Ungarn. Nach Neumayr, „Erdgeschichte". Vgl. Text, S. 435.

gesprochen und auch eine Reihe ihrer Verbindungen mit Silicium, beziehungsweise Kieselsäure genannt. Wir haben auch schon erwähnt, daß das Aluminium nur äußerst schwer wieder aus dieser Verbindung zu trennen ist, weshalb dieses Element, das uns in den alluvialen Anschwemmungen fast überall umgibt, doch erst 1827 von **Wöhler** entdeckt wurde. Auch die übrigen Leichtmetalle sind schwer von ihren Verbindungen mit dem Sauerstoff, wie sie in der

Natur vorkommen, zu lösen. Man hielt deshalb Kali, Natron, Kalk u. s. w. für einfache Stoffe, bis 1807 und 1808 Davy das Kalium, Natrium, Calcium, Barium, Strontium und Magnesium mit großer Mühe aus ihren Oxyden abschied.

Je weiter wir nun in der Reihe der Metalle, die wir auf S. 427 angegeben haben, fortschreiten, desto weniger oxydationsfähig erweisen sie sich, und desto leichter geben sie also auch den Sauerstoff wieder ab. Es tritt hier in unserer Gruppierung der Elemente eine Art von Ringbildung hervor, so daß ihre äußersten Enden nicht die äußerst entgegengesetzten chemischen



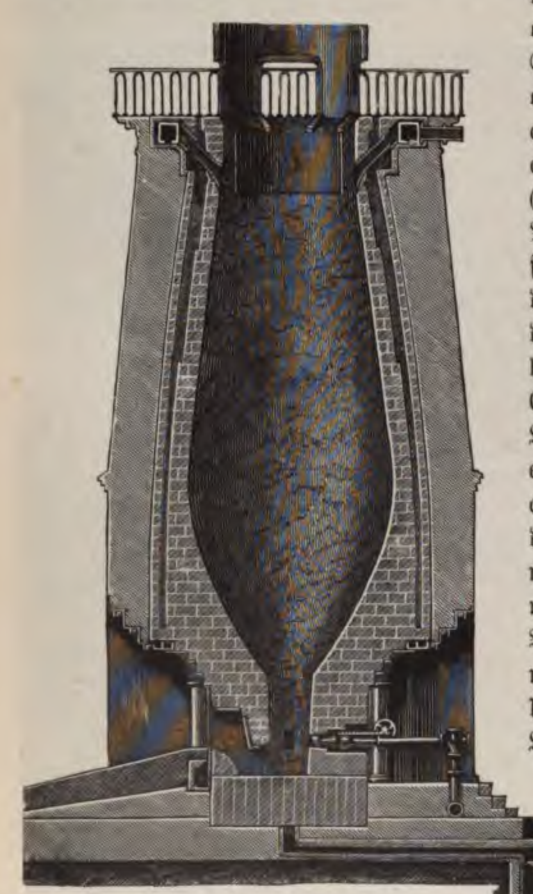
Etagenbau am Eisenerzer Erzberg. Nach Neumayr, „Erdgeschichte“. Vgl. Text, S. 438.

Eigenschaften vertreten, sondern wieder mehr und mehr Ähnlichkeiten, geringere chemische Verwandtschaften zeigen.

Das Eisen hat noch eine größere Reihe von Oxydationsstufen. Der gewöhnliche Eisenrost ist ein Eisenoxydul FeO. Die Eisenoxyde, Fe_2O_3, bilden einen großen Teil der Erdrinde, wie das Eisen überhaupt nach dem Zeugnis des Spektroskops ein im ganzen Universum weitverbreitetes Element ist. Das Mineral Eisenglanz ist reines wasserfreies Eisenoxyd, ebenso das Roteisenerz; das Brauneisenerz ist Eisenoxyd mit chemisch gebundenem Wasser. Das Magneteisenerz oder der Magnetit ist dem gewöhnlichen Eisenrost nahe verwandt. Seine chemische Formel ist $FeO.Fe_2O_3$; es tritt also zum Eisenoxydul noch Eisensäure Fe_2O_3. Fast alle Eisenerze sind mit Oxyden anderer Metalle der Eisengruppe vergesellschaftet, so namentlich

mit Kobalt und Nickel, auch mit Chrom. Der **Siderit** oder **Spateisenstein** ist ein Karbonat des Eisenoxyds, $FeCO_3$, und tritt in mächtigen Lagern zutage. Am berühmtesten ist der Tagebau am **Erzberge** in **Eisenerz** (Steiermark), wo schon seit zwei Jahrtausenden dieses aller Welt nützliche Mineral gewonnen wird (s. die Abbildung, S. 437).

Aus diesen Eisenoxyden wird durch den Hochofenprozeß zunächst das **Roheisen** gewonnen. Dies geschieht, indem man das Erz, mit den sogenannten Zuschlägen vermengt, abwechselnd mit Kohle geschichtet in dem Hochofen erhitzt. Die Kohle entzieht dem Erz seinen Sauerstoff, mit dem sie sich zu Kohlendioxyd oder Kohlensäure verbindet. Sauerstoff hat also größere Verwandtschaft zum Kohlenstoff als zum Eisen. Das unten aus dem Hochofen (s. die nebenstehende Abbildung) abfließende Metall würde sich aber in diesem glühendflüssigen Zustande leicht wieder mit dem Sauerstoff der Luft verbinden. Um dies zu verhindern, dient der Zuschlag, der aus erdigen Stoffen besteht, welche leichte, auf dem abfließenden Eisen schwimmende Schlacken bilden, die die Luft abschließen. Das so gewonnene Roheisen enthält noch 2—5 Prozent Kohlenstoff und andere Beimengungen, Silicium, Phosphor, die schwerer vom Eisen zu trennen sind, und wird in diesem Zustand als **Gußeisen** verwendet. **Schmiedeeisen** muß frei von diesen Bestandteilen sein, die es hart und brüchig machen. Man erreicht die Reinigung durch Umschmelzen unter reichlichem Zutritt der Luft, die mit der Kohle und den übrigen Beimengungen flüchtige Oxyde bildet. Das Schmiedeeisen ist deshalb weich und schweißbar.

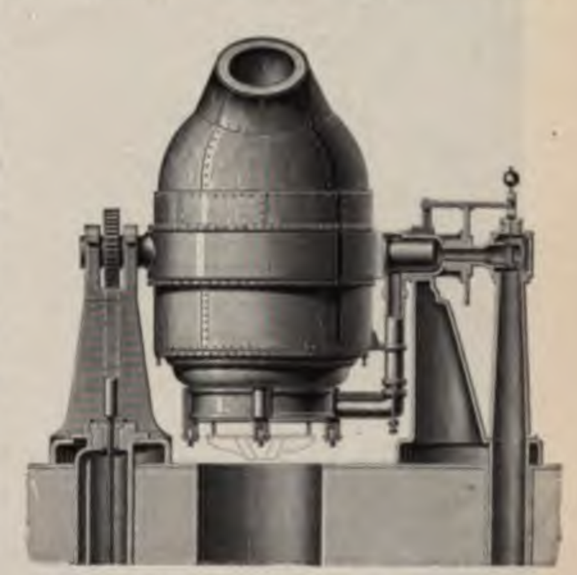


Hochofen zur Roheisengewinnung.

Stahl ist ein möglichst reines Eisen mit einem gewissen kleinen Kohlenstoffgehalt (bis zu 1 Prozent), der ihm seine besondere Härte gibt, die nur noch von der des seltenen Iridium, des Diamanten und der beiden künstlichen Verbindungen Siliciumkarbid und Borkarbid übertroffen wird. Die Gewinnung des Stahles aus dem Roheisen geschieht unter anderem auch durch den **Bessemerprozeß**. Bei diesem wird unter Anwendung eines kräftigen Gebläses das flüssige Roheisen einem starken Luftstrom ausgesetzt, der alle schädlichen Beimengungen verbrennt und eine so große Hitze entwickelt, daß selbst der Stahl in höchster Weißglut flüssig bleibt. Das Metall hat dabei eine Temperatur von etwa 2000 Grad. Die Gefäße, welche bei diesem Prozeß angewendet werden, die sogenannten Bessemerbirnen (s. die Abbildung, S. 439), sind im Inneren mit feuerfestem Material, dem Futter, ausgekleidet, das unter Umständen die Beimengungen

mit absorbiert und eine phosphorhaltige Schlacke bildet, die zu landwirtschaftlichen Zwecken als Thomasphosphat Verwendung findet. Solche Bessemerbirnen enthalten bis zu 160 Zentner flüssigen Stahl. Um ihn zu gewinnen, muß man dem gewöhnlichen Roheisen zunächst allen Kohlenstoff entziehen. Diesen Reinigungsprozeß überwacht man neuerdings mit dem Spektroskop, mit dem man die entweichenden Gase untersucht. Erst nach der völligen Befreiung von Kohlenstoff wird wieder der ganz bestimmte Prozentsatz davon hinzugefügt, welcher dem Stahl seine Stellung zwischen dem kohlenstoffreichen Roheisen und dem völlig entkohlten Schmiedeeisen gibt.

Das Roheisen und der Stahl sind keine bloßen Gemische von Eisen und Kohlenstoff, sondern wahre chemische Verbindungen, sogenannte Karbide. Es mag bei dieser Gelegenheit gleich mit erwähnt werden, daß der Kohlenstoff auch noch mit anderen Elementen ähnliche sauerstofffreie Verbindungen eingeht, die meist nur wie die des Stahls unter Anwendung sehr hoher Hitzegrade entstehen. Man wendet in neuerer Zeit den sogenannten elektrischen Ofen an, bei dem zwischen den Kohlen einer Art von Bogenlampe, die in entsprechender Weise umgeformt ist, ein Strom von mehreren tausend Ampère überspringt und dadurch die größten bisher erreichbaren Hitzegrade entwickelt. In solchen elektrischen Öfen wird unter anderem auch das in letzter Zeit allgemein bekannt gewordene Calciumkarbid hergestellt, das die eigentümliche Eigenschaft hat, in Verbindung mit dem Wasser ein mit weißleuchtender Flamme brennbares Gas, das Acetylen, zu bilden, indem sich das Calcium des Karbids mit dem Sauerstoff des Wassers zu Kalk, CaO, und der Kohlenstoff mit dem Wasserstoff zu jenem Gase, C_2H_2, verbindet. Auch mit dem ihm so ähnlichen Silicium verbindet sich unter solchen Hitzegraden der Kohlenstoff zu Siliciumkarbid, auch Karborundum genannt, dessen Härte vielleicht noch die des Stahles übertrifft, und das deshalb als Schleifmittel verwendet wird.



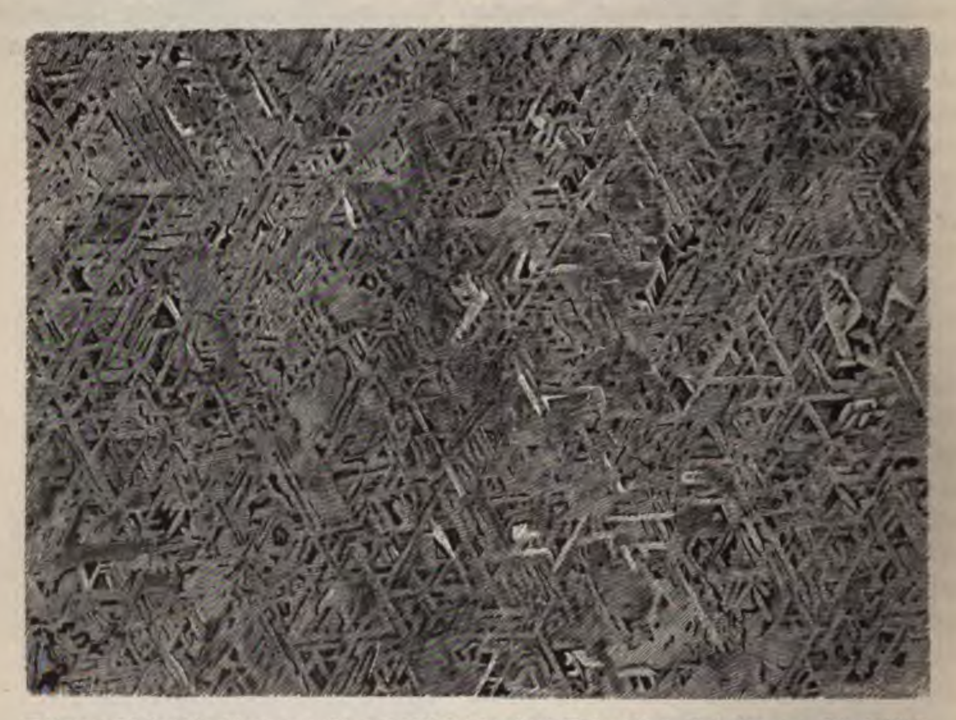
Bessemerbirne zur Stahlbereitung. Vgl. Text, S. 438.

Die vielen anderen Oxyde der Eisengruppe überspringen wir und erwähnen nur noch das des Urans, das in der Natur als Uranpecherz oder Pechblende vorkommt und durch die Entdeckung der in ihm enthaltenen radioaktiven Substanzen (S. 409) in jüngster Zeit zu großer Berühmtheit gelangt ist. Die Pechblende ist uransaures Uranoxydul mit der Formel $3UO_2 + 2UO_3$. Wie schon früher erwähnt wurde, ist dieses stets mit einer großen Anzahl Beimengungen vergesellschaftet, unter denen sich jenes neue radioaktive Element Radium noch immer zu verbergen weiß.

Es mag schließlich auch noch das Mangansuperoxyd, MnO_2, erwähnt werden. Es bildet den hauptsächlichen Bestandteil des sogenannten Braunstein, der bereits durch bloßes Erhitzen einen Teil seines Sauerstoffgehaltes abgibt und deshalb vielfach zur Gewinnung dieses Gases verwendet wird.

Die Oxyde der Bleigruppe kommen wesentlich seltener als Mineralien vor, wie die der Eisengruppe. Wir erwähnen das **Rotkupfererz**, Kupferoxydul, Cu_2O, die **Bleiglätte**, Bleioxyd, PbO, und die **Mennige**, Pb_3O_4, die etwas mehr Sauerstoff enthält, also als Bleioxyduloxyd zu bezeichnen ist, endlich den **Zinnstein**, SnO_2, Zinnoxyd. Diese schwereren Metalle kommen schon viel häufiger in gediegenem Zustand in der Erdrinde vor als die der Eisengruppe.

Bekanntlich ist das Eisen in natürlichem gediegenen Zustande sehr selten, ja man glaubte, daß es außer in den aus dem Weltraume zu uns herabfallenden **Eisenmeteoriten** auf der Erde überhaupt nicht vorkomme. Das meteorische Eisen unterscheidet sich von dem gediegenen



Widmannstättensche Figuren auf der Schlifffläche eines Meteoriten. Nach Neumayr, „Erdgeschichte".

Eisen irdischen Ursprungs durch seinen weit größeren Nickelgehalt und nimmt dadurch ein eigentümliches kristallinisches Gefüge an, das nach einer gewissen Behandlung die sogenannten **Widmannstättenschen Figuren** bildet (s. die obenstehende Abbildung), an denen man den kosmischen Ursprung einer Eisenmasse auch erkennen kann, wenn man sie nicht wirklich aus dem Weltraume niederfallen sah. Ferner ist auf S. 441 der größte im Falle wirklich beobachtete Eisenmeteorit dargestellt, der 39 kg wiegt und 1751 in Hraschina bei Agram niederging. Wir sehen, wie das Eisen offenbar von einem heftigen Schmelzprozeß angegriffen wurde, der tiefe Löcher in seine Oberfläche grub. Das meteorische Eisen enthält auch häufig Kohlenstoff in Form von Graphit oder selbst in kristallinischer Form als ganz kleine Diamanten. Die Widmannstättenschen Figuren sind übrigens auch bei Eisen irdischen Ursprungs darzustellen, wenn man es in dem gleichen Prozentsatze mit Nickel mischt. Jener außerhalb der Erde erfolgte Kristallisationsprozeß im Meteoreisen ging also nach keinen anderen Gesetzen vor sich, als auch bei uns herrschen. Ein Stück gediegenes Eisen von nicht weniger als 909 kg

fand man 1884 in Westaustralien und konnte seinen kosmischen Ursprung unzweifelhaft nachweisen. Wahre Felsen aus reinem Eisen fand Nordenskiöld 1870 bei Ovifak in Grönland, den größten mit 25,000 kg Gewicht. Der auf S. 442 abgebildete Eisenblock wurde schon 1818 von John Roß bei Kap York in Grönland entdeckt und erst kürzlich durch Peary nach Amerika geschafft. Er ist 4 m lang, 1,3—2 m hoch und wiegt 80 Tonnen. Für die Eskimo dieser sonst mit den Gaben der Natur so karg bemessenen Gebiete war dieses gediegene Eisen, das ihnen vorzügliches Material für Geräte bot, ein wahres Geschenk des Himmels, durch welches



Meteor von Hraschina bei Agram. Nach Neumayr, „Erdgeschichte". Vgl. Text, S. 440.

sie ohne ihr Zutun aus der Steinzeit in das Zeitalter des Eisens emporgehoben wurden. Es scheint jedoch nicht, daß alle diese Eisenmassen wirklich kosmischen Ursprungs sind.

Wir haben uns hier mit dem gediegenen Vorkommen des Eisens beschäftigt, um zu zeigen, wie selten dasselbe ist, während doch Eisenverbindungen in gewaltigen Mengen in der Erdrinde enthalten sind. Die noch leichter oxydierbaren leichten Metalle kommen gediegen überhaupt nicht vor; dagegen wird das Verhältnis des gediegenen Auftretens gegenüber den Verbindungen für das erstere immer günstiger, je tiefer wir in unserer chemischen Reihe hinabsteigen. Hieraus entnehmen wir, daß seit den Urzeiten ein andauernder Oxydationsprozeß den freien Sauerstoff mehr und mehr in feste Verbindungen gezwungen hat, und daß alle Elemente daran je nach ihrer größeren oder geringeren Verwandtschaft zum Sauerstoff beteiligt waren. Die ganze Erdrinde ist ein chemisches Verbrennungsprodukt. Man schätzt, daß 300 Trillionen kg Sauerstoff in ihr oxydiert, verbrannt festliegen, während nur noch eine Trillion, also der dreihundertste Teil davon, in der Atmosphäre als „Lebensluft" frei zum Gebrauche der Organismen

zur Verfügung steht. Auch dieser würde bald verschwunden sein, wenn nicht die Pflanzen in einer für uns noch ganz geheimnisvollen Weise es verständen, den Sauerstoff wieder aus seinen Verbindungen zu „reduzieren", ein Prozeß, der in der leblosen Natur nur unter sehr selten eintretenden Bedingungen in geringem Umfang eintritt. Den Sauerstoff, welchen die Gesteine einmal gebunden haben, geben sie ohne besondere Eingriffe niemals wieder heraus.

Blei kommt noch ziemlich selten gediegen, aber auch nicht in einfachen Oxyden vor, sondern die Bleierze sind meist Sulfate, worauf wir zurückkommen. Quecksilber findet man



Der große Meteorit vom Kap York in Nordgrönland. Nach Ratzel, „Die Erde und das Leben". Vgl. Text, S. 441.

gediegen in Drusen, d. h. in kleinen Höhlungen, eingeschlossen, hauptsächlich aber wird es aus dem Zinnober, gleichfalls einem Sulfat, gewonnen. Ähnliches ist vom Kupfer und Silber zu sagen, doch kommen diese schon wesentlich häufiger gediegen vor. Gold und Platin sind nur gediegen gefunden worden.

Künstlich lassen sich verschiedene Oxydationsstufen auch der Metalle dieser letzten Gruppe herstellen.

b) Sulfide.

Der Schwefel gehört derselben Gruppe an wie der Sauerstoff und ist ihm deshalb in seinem chemischen Verhalten ungemein ähnlich. Er verbindet sich mit den übrigen Elementen, insbesondere mit den Metallen, in denselben Verhältnissen wie der Sauerstoff. Man nennt die daraus entstehenden Verbindungen Sulfide, die mit den Oxyden große Ähnlichkeit haben. Die Oxyde sind ihnen völlig gleichwertig, so daß ihre chemische Formel nur durch Umänderung

des O in S entsteht. Umgekehrt allerdings entsprechen bezüglich ihrer Verwandtschaft zu den Metallen nicht allen Oxyden auch Sulfide. Schwefel verbindet sich nicht ebenso leicht mit allen anderen Körpern wie Sauerstoff. Vielfach muß man dazu die Wärme zu Hilfe nehmen, wo die Sauerstoffverbindung ohne weiteres stattfindet. Deshalb wird Schwefel vielfach durch Sauerstoff aus seinen Verbindungen getrieben.

Schwefel kommt auch als Element vor, aber nur in vulkanischen Gegenden oder Thermen. Es ist wahrscheinlich, daß er hier durch Ausschmelzen, beziehungsweise Auslaugen von Schwefelverbindungen und nachträgliche Sublimation entstand. Dieser natürliche Schwefel zeigt dieselbe rhombisch-oktaedrische Kristallform, die man durch Sublimation aus Schwefeldampf auch künstlich erhält; doch gibt es noch zwei andere Formen dieses Elementes, also im ganzen drei allotrope Modifikationen, während wir beim Sauerstoffe deren zwei (gewöhnlichen Sauerstoff und Ozon) kennen lernten. Man bezeichnet die drei Allotropien des Schwefels als α-, β- und γ-Schwefel. Der β-Schwefel entsteht durch langsames Auskristallisieren aus geschmolzenem Schwefel; seine Kristalle haben eine ganz verschiedene Form wie die des sublimierten Elementes. Kristalle des α-Schwefels sind hierneben abgebildet. Der γ-Schwefel ist unkristallinisch, amorph. Alle drei Formen haben verschiedene spezifische Gewichte und auch sonst verschiedene Eigenschaften; doch sind die beiden letzten Formen nicht beständig, da sie langsam in die erste von selbst übergehen. Innerhalb nicht allzuweiter Temperaturgrenzen nimmt Schwefel alle drei Aggregatzustände an; er schmilzt bei 114° und siedet bei 448°.



Kristalle des α-Schwefels. Nach der Natur.

Von seinen Verbindungen mit dem Sauerstoff haben wir bereits gesprochen. Von den Salzbildnern, mit denen er sich gleichfalls verbindet, ist noch im besonderen zu reden (S. 444).

Mit dem Stickstoff selbst, der überhaupt ein sehr träges Element ist, geht der Schwefel keine Verbindung ein, wohl aber mit anderen Gliedern seiner Gruppe. Die Verbindung P_2S_5 entspricht nach Vertauschung des S mit O genau der Phosphorsäure; man nennt sie Phosphorpentasulfid. (Alle höheren Verbindungen mit dem Schwefel heißen Sulfide, die niederen Sulfüre.) Unter den Erzen kommt Arsendisulfid, As_2S_2, und Arsentrisulfid, As_2S_3 (Realgar und Operment), sowie Antimontrisulfid, Sb_2S_3 (Antimonglanz), vor.

Der Kohlensäure entspricht als Sulfid der Schwefelkohlenstoff, CS_2. Er ist eine übelriechende, wasserhelle, äußerst leicht Feuer fangende Flüssigkeit, die uns bereits wegen ihres großen Farbenzerstreuungsvermögens interessiert hat (S. 256). Er siedet schon bei 48°, und seine Feuergefährlichkeit rührt daher, daß er im gasförmigen Zustande sich außerordentlich leicht mit dem Sauerstoff zu Kohlensäure und schwefliger Säure verbindet. Schwefelkohlenstoff hat ein großes Lösungsvermögen, namentlich für Fette, und wird wegen dieser Eigenschaft vielfach verwendet.

Dem Wasser entspricht als Sulfid der Schwefelwasserstoff, H_2S. Unter normalen Temperatur- und Druckverhältnissen tritt indes diese Verbindung nur als Gas auf, das aber

durch Wasser stark absorbiert wird (Schwefelwasserstoffwasser). Es verbreitet einen üblen Geruch wie faule Eier, weil es sich aus Fäulnisprozessen tierischer Substanzen bildet, hat aber alle Eigenschaften einer Säure, namentlich zeigt es die bekannte Säurereaktion auf blaues Lackmuspapier durch Rotfärbung. Dies ist merkwürdig, weil es keinen Sauerstoff enthält; dagegen ist es eine Wasserstoffsäure, deren wir noch mehrere kennen lernen werden. Schwefelwasserstoff greift indes nur die Metalle der Bleigruppe, nicht die der Eisengruppe an und verwandelt sie in Schwefelblei, Schwefelkupfer, Schwefelsilber u. s. w. Wir bemerken dies beim Gebrauche silberner Bestecke, die durch Berührung mit dem oft in der verunreinigten Luft fein verteilten Schwefelwasserstoff schwarz „anlaufen", während nickelüberzogene Geräte dies nicht tun.

Es gibt zwar Schwefelkalium und -natrium, K_2S und Na_2S, aber Magnesium und Aluminium verbinden sich nicht allein mit dem Schwefel.

Schwefel und Eisen verbinden sich entweder unter Mitwirkung von Wasser bei normaler Temperatur oder trocken in der Glühhitze zu Schwefeleisen, FeS, Eisensulfür. Die höhere Schwefelungsstufe des Eisens, Eisendisulfid, FeS_2, ist das bekannte Mineral Schwefelkies, das schöne goldglänzende Kristalle bildet und deshalb von Laien oft für gediegenes Gold gehalten wird. Außerdem gibt es Schwefelzink, Nickelsulfid u. s. w.

Aus der Bleigruppe haben wir den Bleiglanz, PbS, zu erwähnen. Kupferglanz, Cu_2S, und Silberglanz, Ag_2S, sind Sulfüre. Letzteres ist das Rotgiltigerz, das verbreitetste Mineral, aus welchem Silber gewonnen wird. Es mag an dieser Stelle kurz angedeutet werden, wie man aus diesen mineralischen Sulfiden die Metalle gewinnt. Da diese Verbindungen der Metalle mit Schwefel ohne weiteres nicht reduzierbar sind, muß man sie zuvor „rösten", wie der hüttentechnische Ausdruck lautet, indem man sie bei reichlichem Luftzutritt erhitzt, wodurch das Metallatom seinen Schwefel gegen Sauerstoff austauscht, so daß auf diese Weise ein Metalloxyd entsteht. Bei diesem Prozeß verbindet sich der Schwefel gleichzeitig mit dem Sauerstoffe zu schwefliger Säure, die als Nebenprodukt in den „Bleikammern" zu Schwefelsäure verarbeitet wird. Das Metalloxyd reduziert man dann in derselben Weise, wie es bei der Besprechung der Eisengewinnung auf S. 438 beschrieben ist, durch Schmelzen mit Kohle.

Der bekannte Zinnober ist Schwefelquecksilber, HgS, und auch das Zinn verbindet sich noch mit dem Schwefel, während Gold, Platin und seine Begleitmetalle dies nicht mehr tun.

c) Chloride.

Ebenso wie der Schwefel können auch die vier Salzbildner Chlor, Brom, Jod und Fluor unter Umständen den Sauerstoff aus den Oxyden verdrängen und mit den betreffenden Radikalen Chloride, Chlorüre u. s. w. bilden. Die Formeln für diese Verbindungen verändern sich indes nicht nur durch die Substitution der betreffenden Buchstaben, sondern auch die Indizes müssen entsprechend der Einwertigkeit der Salzbildner gegenüber dem zweiwertigen Sauerstoff und Schwefel andere werden.

Die Eigenschaften der Chloride sind in vielen wesentlichen Dingen verschieden von denen der Oxyde und der Sulfide. Sie sind vielseitiger in ihren chemischen Reaktionen, weshalb man diese in saure und basische oder alkalische einteilt. Das einfachste Unterscheidungsmittel dafür ist das bekannte Lackmuspapier, denn alle Stoffe, die blaues Lackmuspapier rot färben, reagieren sauer, während alkalische Stoffe dagegen das rote Papier wieder blau färben. Man hat die Bezeichnung „alkalisch" gewählt, weil die eigentlichen Alkalien, Kali und Natron, diese Reaktion am deutlichsten zeigen; aber es gibt auch eine große Anzahl anders zusammengesetzter

Stoffe, welche alkalisch reagieren. Die Verbindung eines sauer reagierenden mit einem alkalischen Stoffe zeigt weder die eine noch die andere Reaktion; sie läßt blaues und rotes Lackmuspapier unverändert. Einen solchen neutralen Stoff nennt man ein Salz. Die verschiedenen Oxydationsstufen können also unter sich Salze bilden, die man als Oxysalze bezeichnet, während die vier Salzbildner die Haloidsalze ohne Sauerstoffgehalt und ebenso Säuren erzeugen. Dies nur zur allgemeinen Charakteristik der Verbindungen; auf die Eigenschaften kommen wir zurück, wenn wir erst einen Überblick über das allgemeine Vorkommen und die Gruppierungen gegeben haben.

Chlor selbst, dessen Name nach dem griechischen Farbwort chloros gebildet ist, ist ein gelbgrünliches giftiges Gas von eigentümlich stechendem Geruch, das man auch flüssig herstellen oder sich im Wasser zu Chlorwasser absorbieren lassen kann.

Fluor ist gleichfalls ein dem Chlor sehr ähnliches Gas, das die größte Reaktionsfähigkeit von allen bekannten Stoffen hat, so daß es sich mit allen außer mit Sauerstoff verbindet. Es war deshalb auch sehr schwer, das Fluor aus seinen Verbindungen zu lösen; dies gelang erst 1886 bei Anwendung des elektrischen Stromes und bedeutender Kältegrade, die alle Reaktionsfähigkeit einschränken. Die verbreitetste in der Natur vorkommende Verbindung des Fluors ist der Flußspat, Flourcalcium, CaF_2, der seinen Namen von der Eigenschaft hat, als Zusatz bei hüttenmännischen Prozessen deren Produkte beim Erhitzen leichter flüssig zu machen. Freies Fluor darf, ebenso wie seine schon früher erwähnte Säure, nur in Platin-, Gold-, Kautschuk- oder Bleigefäßen aufbewahrt werden, da es selbst Glas oder Tongefäße zersetzt.

Brom ist eine leicht verflüchtigende Flüssigkeit, die chlorartig riecht und neben dem Chlor einen nicht unwesentlichen Bestandteil des Meerwassers bildet.

Jod ist ein fester Körper, der sich nur schwer in Wasser, leicht in Weingeist löst (Jodtinktur), bei 113° schmilzt und bei 176° siedet. Seine Dämpfe haben eine schön violette Farbe.

Chlor, Brom und Jod haben in gewissen Verbindungen die sehr merkwürdige Eigenschaft, sich schon im Lichte zu zersetzen. Dies hat zu der wichtigen Anwendung beim photographischen Prozeß geführt, bei dem man durch Auftragung von Chlor- oder Bromverbindungen lichtempfindlich gemachte Platten und Papiere benutzt. Aber auch physikalisch ist die Lichtempfindlichkeit vom höchsten Interesse. Stellt man Chlorwasser, das im Dunkeln unzersetzt bleibt, längere Zeit ins Licht, so entweicht ihm Sauerstoff, während es sich selbst in wässerige Chlorwasserstoffsäure (Salzsäure) verwandelt, deren Formel (ohne Wassergehalt) HCl ist.

Es besteht demnach eine viel größere Verwandtschaft des Chlors zum Wasserstoff als zum Sauerstoff. Aus der Zersetzung des Wassers durch das Chlor unter Einwirkung des Lichtes wird dies deutlich. Nach Spaltung des Wassermoleküls reißt das Chlor das Wasserstoffatom an sich und läßt das Sauerstoffatom frei. Dies ist eine allgemeine Eigenschaft der Salzbildner, aus der sich ihre desinfizierenden und bleichenden Eigenschaften erklären. Sie nehmen den organischen Stoffen den stets in ihnen enthaltenen Wasserstoff weg und zersetzen sie dadurch. Die Zuneigung des Chlors zu diesem zeigt sich auch, wenn man dem Chlor die Arbeit nimmt, den Wasserstoff erst aus seiner Verbindung im Wasser herauszureißen, indem man gleiche Raumteile von Chlor und Wasserstoff mischt. Es geschieht dann deren Verbindung zu Salzsäure unter Einwirkung des Lichtes mit einer heftigen Explosion der Mischung, die man deshalb auch Chlorknallgas nennt. Im Gegensatze zum gewöhnlichen Knallgas, das erst durch die kräftigere Einwirkung einer Flamme oder eines Funkens zur Explosion kommt, bildet sich also das Chlorknallgas schon durch bloße Bestrahlung mit Licht.

Die chemische Formel der Salzsäure ist HCl, enthält demnach keinen Sauerstoff. Wir sehen hieraus, daß auch der Wasserstoff Säuren bilden kann, dies aber, den schwach sauer wirkenden Schwefelwasserstoff ausgenommen, nur mit den Salzbildnern tut. Man nennt deshalb diese Säuren Haloidsäuren oder Hydrosäuren, im Gegensatze zu den Oxysäuren, und die mit den ersteren gebildeten Salze werden dementsprechend Haloidsalze genannt.

Wir überspringen die Chloride der Sauerstoff-, Stickstoff- und Kohlenstoffgruppe, von denen an dieser Stelle nichts Wesentliches zu sagen ist, und wenden uns sogleich zu der hauptsächlichsten Funktion der Halogene, ihren Salzbildungen.

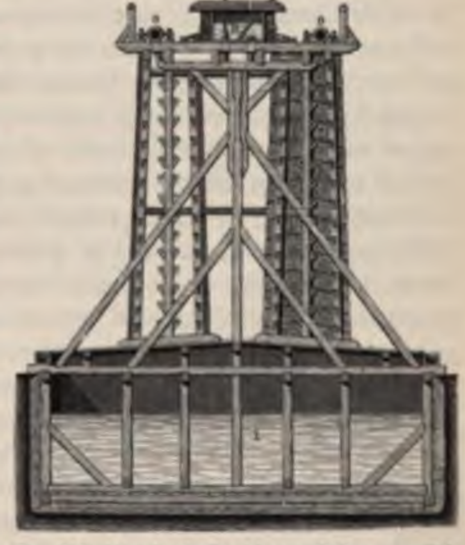
Alle diese Salze entstehen durch Auflösung der Metalle in Salzsäure, beziehungsweise in Brom-, Jod- oder Fluorwasserstoffsäure. Wir wissen bereits, daß diese Säuren nur Gold und Platin nicht angreifen, doch sei erwähnt, daß eine Verbindung von Salzsäure und Salpetersäure (Königswasser) auch diese Metalle löst. Bei Lösungen in Salzsäure verbinden sich die Metalle mit dem Chlor und lassen den Wasserstoff entweichen, weshalb diese Reaktion das einfachste Mittel zur Gewinnung jenes Gases bietet. Ebenso wie bei der Verbindung des Sauerstoffs mit den Metallen zeigt sich auch hier, daß die leichteren Metalle die festeren Verbindungen eingehen.



Salzbergwerk bei Staßfurt. Nach Photographie. Vgl. Text, S. 447.

Die bekannteste derselben ist das Chlornatrium, das gewöhnliche Kochsalz, NaCl, von dem alle übrigen Salze ihre allgemeine Bezeichnung genommen haben. Es kommt, wie jedermann weiß, im Meerwasser vor, das von ihm zwischen 2,6 bis 1,4 Prozent enthält. Bedenkt man, wie große Mengen Wasser sich in den Meeresbecken befinden, so müssen wir das Kochsalz als einen der verbreitetsten Stoffe auf der Erde betrachten, und das Spektroskop hat gezeigt, daß seine beiden Komponenten auch außerhalb unseres Planeten eine sehr hervorragende Rolle spielen. Gewisse Binnenseen, besonders das sogenannte Tote Meer und der große Salzsee in Nordamerika, enthalten noch weit größere Mengen dieses Salzes und zugleich auch der anderen im Meere mit ihm vergesellschafteten Salze. Es ist kein Zweifel, daß diese großen Binnenseen einst Meeresteile waren, die durch geologische Einflüsse abflußlos von ihnen getrennt wurden und nun langsam ihren Wassergehalt verdampfen. Würden durch klimatische oder andere Veränderungen die Zuflüsse der Ostsee versiegen, so würde auch ihr Abfluß zwischen

Jütland und Skandinavien bald verstopft werden, und die Ostsee würde gleichfalls an Salzgehalt allmählich mehr und mehr zunehmen, obgleich sie gegenwärtig daran ärmer ist als das offene Meer, eben wegen der beständigen Zuflüsse an süßem Wasser und dem engen Abfluß, der einen Ausgleich des Salzgehaltes verhindert. Schließlich müssen solche Salzseen ihr letztes Wasser verdampfen und zu Salzlagern werden, wie man sie im Erdinneren vielfach findet. Diese haben ohne Zweifel den beschriebenen Ursprung. Berühmte Salzbergwerke sind die von Staßfurt (s. die Abbildung, S. 446) und von Wieliczka. Das unter der norddeutschen Tiefebene befindliche Salzlager hat eine Mächtigkeit (senkrechte Tiefe) von mehr als 1000 m und erstreckt sich mehrere hundert Kilometer weit oft ziemlich nahe unter der Erdoberfläche hin. Ganz Berlin steht über diesem großen eingetrockneten Meeresbecken vergangener Zeitalter; deshalb kann man dort bei genügender Tiefbohrung überall künstliche Solquellen erschließen. Vielfach gewinnt man auch das Salz aus solchen Solquellen, indem man in die Bohrlöcher Wasser laufen läßt, das Salz auflöst und die in die Leitungen (o und n) hinaufgepumpte Sole über ein Gradierwerk (s. die nebenstehende Abbildung) führt, in welchem sie langsam über Reiser (h) herabfließt. Ein großer Teil des Wassers verdampft dabei, während man den im Sammelbecken (i) verbliebenen Rest durch Kochen in der Saline entfernt.



Durchschnitt eines Gradierwerkes. o, n Solleitung; h Reiserwand; i Sammelbecken.

Das Kochsalz ist das einzige Genußmittel aus dem Bereiche der anorganischen Verbindungen. Zwar kann es ebensowenig wie alle anderen nicht organisierten Substanzen selbst verdaut werden, also auch nicht zur Nahrung dienen, aber es unterstützt die Verdauung, indem es im Magen die dazu nötige Salzsäure bildet. Es ist ein Bestandteil des Blutes und kommt auch in geringen Mengen in den Pflanzenkörpern vor.

Dem Kochsalz ähnlich ist das Chlorkalium, KCl, das mit dem Chlormagnesium, $MgCl_2$, sowohl im Meerwasser als auch im Steinsalz vorkommt und aus dem letzteren zu Düngezwecken gewonnen wird (Staßfurter Kalisalze).

Chlorcalcium, $CaCl_2$, ist wegen seiner wasserentziehenden Eigenschaften wohlbekannt.

Von den einfachen Chloriden der schweren Metalle nennen wir hier nur das Silberchlorid, Chlorsilber, $AgCl$, und das diesem entsprechende Jod- und Bromsilber, die bekannten Hilfsmittel des schon erwähnten photographischen Prozesses, ferner das gleichfalls photographisch zur sogenannten Goldtonung verwendete Chlorgold, $AuCl_3$, das durch Erhitzen sein metallisches Gold leicht wieder abgibt und dadurch zeigt, daß auch das Chlor nur noch eine schwache Verwandtschaft zu jenem hat. Das Gleiche beobachtet man an den betreffenden Platinverbindungen.

d) Die Verbindungen der Stickstoffgruppe.

Stickstoff ist bekanntlich ein Gas, das den größten Teil unserer atmosphärischen Luft bildet. Nach neueren Untersuchungen enthalten 100 Raumteile Luft 77,4 Teile Stickstoff und

20,8 Teile Sauerstoff, während die übrigen 1,8 Teile sich etwa zur Hälfte aus Wasserdampf und zur anderen Hälfte aus Kohlensäure und den neuentdeckten Gasen **Argon, Krypton, Neon, Xenon** zusammensetzen, die also zusammen beinahe 1 Prozent der gesamten Luft ausmachen. Trotzdem wir beim Atmen weit größere Mengen Stickstoff in unseren Körper einführen als Sauerstoff, wird doch von ihm dabei nichts verwendet; wir atmen den Stickstoff wieder unverändert aus, während der Sauerstoff zum großen Teil in unseren Lungen an Kohlenstoff gebunden wird, wodurch wir allein unser Leben erhalten. Man darf aber daraus nicht schließen, daß der Stickstoff ein unnützer Bestandteil der Luft sei; er ist vielmehr als Verdünnungsmittel des Sauerstoffs unbedingt nötig. Reinen Sauerstoff vertragen wir ebensowenig auf die Dauer wie etwa reinen Alkohol, der verdünnt, obwohl die Antialkoholiker dagegen eifern, ein sehr nützliches Genußmittel ist. Auch der reine Sauerstoff würde uns berauschen und ist aus diesem Grund, in zu großen Quantitäten genossen, durchaus als ein Gift zu betrachten wie der Alkohol. In diesem Sinne wirken ja viele sogenannten Gifte in der Verdünnung heilsam. Dem Stickstoff aber hat man seinen Namen mit großem Unrecht gegeben, denn er ist ein fast ganz indifferenter, unschuldiger Stoff, der nur allein aufgenommen schädlich wirkt, wie jede andere Entziehung von Nahrung uns ja auch töten müßte. Mit der Schädlichkeit anderer Gase hat es dagegen eine ganz andere Bewandtnis. Chlor zum Beispiel wirkt, nur in ganz geringen Mengen der Luft beigemischt, wirklich erstickend, weil es unsere Atmungsorgane zerstört.

Wahrscheinlich ist das Verhältnis von Sauerstoff zu Stickstoff in der Luft in früheren Schöpfungsperioden ein anderes zu gunsten des Sauerstoffs gewesen, von dem wir ja schon hörten, daß er seither in ungeheuern Mengen durch den Oxydationsprozeß an die Gesteine gebunden worden ist. Hiermit im Zusammenhange mag die üppigere Entwickelung der Tierwelt jenes Zeitalters stehen, deren Organe jenem größeren Sauerstoffreichtum angepaßt sein mußten.

Nicht nur gegenüber dem menschlichen Körper und der gesamten organischen Welt ist der Stickstoff indifferent, sondern überhaupt als chemischer Körper, denn er verbindet sich nur mit sehr wenigen anderen Körpern bei bloßer Berührung. Die meisten seiner Verbindungen können nur auf Umwegen erzielt werden. Seine Bereitung aus der Luft bietet deshalb keine Schwierigkeiten, man braucht nur auf irgend eine Weise den Sauerstoff aus ihr zu entfernen. Dies erreicht man z. B., wenn man die Luft über glühende Metalle führt, die sich dann mit dem Sauerstoff zu Oxyden verbinden, so daß als Rest der Stickstoff übrigbleibt.

Wenigstens meinte man dies bis vor einigen Jahren, obgleich schon etwa ein Jahrhundert zuvor **Cavendish** mitgeteilt hatte, daß nach der chemischen Absorption auch des auf diese Weise aus der Luft gewonnenen Stickstoffes noch immer ein Rest von etwa 1 Prozent bleibt, der etwas anderes sein müsse. Wegen der sehr großen chemischen Trägheit des Stickstoffes ist jene Absorbierung mit Schwierigkeiten verbunden, weshalb erst in neuerer Zeit diese Untersuchungen von **Ramsay** wiederholt worden sind, der dabei 1895 zuerst das **Argon** und später die anderen oben angeführten neuen Gase entdeckte. Man hat sie in der übrigen Natur nicht auffinden können, außer in Stoffen, wie z. B. den Meteoriten, von denen man annehmen muß, daß sie mit der Luft in enger Berührung gewesen sind und aus dieser mit dem Stickstoff auch die ihn beständig begleitenden Beimengungen aufgenommen haben. Sie verhalten sich also zum Stickstoff wie etwa das Iridium, Palladium, Osmium u. s. w. zum Platin.

Die den Stickstoff begleitenden neuen atmosphärischen Gase sind theoretisch ungemein interessant, weshalb wir uns hier trotz ihres chemisch gänzlich indifferenten Charakters mit ihnen einen Augenblick beschäftigen.

Zunächst wird es allgemein interessieren, zu erfahren, wie man diese Stoffe entdeckt hat. Es wird dem Laien ja recht seltsam erscheinen, daß man das Argon, von dem in jedem mittelgroßen Wohnzimmer ca. 1000 Liter sind, nicht schon früher fand. Aber wir wissen ja, daß es ein außerordentlich träger Stoff ist, der seine Gegenwart durch keinerlei Einwirkung unter gewöhnlichen Umständen verrät. Argon zeigt als farbloses, geruchloses, chemisch unwirksames Gas kaum andere Eigenschaften als seine Schwere und unterscheidet sich fast nur durch diese von dem Äther. Rayleigh und Ramsay fanden 1895 das Argon, während sie etwas ganz anderes suchten. Es lag ihnen daran, zu entscheiden, ob das Verhältnis der Atomgewichte des Sauerstoffes zum Wasserstoff genau gleich 16 sei, wie man früher angenommen hatte, oder ob dieser Zahl noch ein Bruch hinzugefügt werden müsse. Diese Frage hat ein tiefergehendes theoretisches Interesse, denn man hatte zu bemerken geglaubt, daß die Atomgewichte ähnlich wie die ihrer Verbindungen in einfachen Verhältnissen zueinander stehen müssen, die durch ganze Zahlen ausgedrückt werden können. Wäre dies wirklich der Fall, so hätte man einen Anhaltspunkt mehr für die Überzeugung, daß auch die Elemente nur Verbindungen sind, und könnte durch jene einfachen Zahlenverhältnisse den eigentlichen Grundstoffen auf die Spur kommen. Die englischen Forscher untersuchten deshalb die Eigenschaften des Sauerstoffes auf das genaueste und prüften ihn ganz besonders auf seine Dichtigkeit, die ja bei einem Gas im direkten Verhältnis zu dessen Atomgewicht steht. Sie untersuchten daraufhin den Sauerstoff verschiedenen Ursprungs und fanden immer dieselbe Zahl für seine Dichtigkeit. Zur Kontrolle prüften sie auch den aus der Luft übriggebliebenen Stickstoff, der sich aber, trotz sorgfältigster Vermeidung jeder Fehlerquelle, immer um etwa ein Hundertstel dichter erwies als ein Stickstoff, der aus irgend einer seiner Verbindungen gezogen worden war. Augenscheinlich war also mit dem atmosphärischen Stickstoff noch ein anderes Gas vermischt, das dichter ist als jener.

Man gelangte nun dadurch zum Ziel, daß man Magnesium glühend machte, was natürlich unter Ausschluß von Sauerstoff geschehen muß, da es sonst verbrennt, und jenes vermutliche Gemisch von Gasen ihm aussetzte. Nach völliger Absorbierung des Stickstoffes durch Verbindung mit dem Magnesium blieb ein gasförmiger Rückstand, der selbst durch jenes energische Mittel nicht aus seiner Trägheit zu bringen war, weshalb die Entdecker dieses neue Gas Argon, den Trägen, nannten. Es zeigte sich, daß in dem atmosphärischen Stickstoff nicht weniger als 1,181 Prozent dieses Gases enthalten ist, und seine Dichte sich zu der des Stickstoffes wie 20:14 verhält. Dabei stellte sich aber die sehr merkwürdige und theoretisch wichtige Tatsache heraus, daß das Molekül des freien Argons mit seinem Atom übereinstimmt, daß es demnach ein einatomiges Gas ist, während wir bisher sahen, daß alle Gase ihre Valenzen gegenseitig sättigen, so daß ihre Gasdichte doppelt so groß ist, als es nach ihrem Atomgewicht erscheint. Das Argon ist so träge, daß es sich nicht einmal mit sich selbst verbindet. Auch das Helium und die anderen neuen atmosphärischen Beimengungen zeigen diese Eigenschaft einatomiger Gase und stehen in dieser Hinsicht als besondere Gruppe einzig da. Das Argon siedet bei —186,9°, schmilzt bei —189,6° und hat ein vollständig von dem des Stickstoffes verschiedenes Spektrum, das namentlich im Grün und Rot zahlreiche Linien aufweist. Man hat es natürlich an Versuchen nicht fehlen lassen, das Argon mit irgend einem anderen Stoffe zu verbinden; es widerstand aber selbst dem Fluor, das sonst alle Substanzen so heftig angreift. Auch wenn man durch das Gemisch von Fluor und Argon den elektrischen Funken schlagen ließ, rührte sich jener träge Stoff nicht. Dagegen scheint es doch nach Berthelot, daß Benzindampf und Schwefelkohlenstoff im elektrischen Funken eine Wirkung auf dasselbe

ausüben. Bei solcher Behandlung verschwand ein Teil des Argons, und es entstand ein festes Pulver, dessen Eigenschaften aber nicht weiter untersucht werden konnten. Vom Wasser wird das Argon dreimal leichter absorbiert als Stickstoff.

Man hätte nun meinen sollen, daß man angesichts solcher Trägheit am Ende der Experimentierkunst angelangt sein müsse. Dennoch verstand es Ramsay nachzuweisen, daß auch dieser Rest noch ein Gemisch verschiedener Gase sei. Er stellte eine größere Menge flüssiger Luft her und ließ sie bis auf einen kleinen Rest wieder verdampfen. War in der Luft noch ein unbekanntes Gas vorhanden, das schwerer verdampft als Sauerstoff, Stickstoff und Argon, so mußte es jetzt in größeren Mengen in dem Rest flüssiger Luft zurückgeblieben sein, als es der gasförmigen beigemengt ist. Tatsächlich zeigte sich bei einem Versuch im Jahre 1898, daß das aus dem nun gleichfalls verflüchtigten Rest erhaltene Gas nur noch schwach das Argonspektrum aufwies, daneben aber ein neues hat, das mit dem keines bekannten Gases übereinstimmte. Man nannte dieses Gas **Krypton**, das Verborgene, das als noch einmal so schwer wie das Argon und ebenfalls einatomig festgestellt wurde.

Als Ramsay später mit großen Mengen Argon (bis zu 18 Litern) experimentierte und es verflüssigte, entdeckte er noch ein dreimal so schweres Gas wie das Argon, das **Xenon**, und ein nur halb so schweres, das **Neon**, so daß die Reihe der einatomigen in der Luft vereinten Gase mit abgerundeten Atomgewichtzahlen lautet: Neon 20, Argon 40, Krypton 80, Xenon 120.

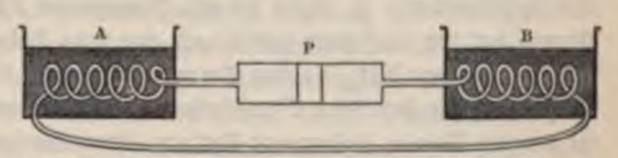
Trotz der großen Trägheit des **Stickstoffes** findet man ihn in zahlreichen Verbindungen am **Aufbau der organischen Natur** beteiligt, so daß er in dieser Gestalt zu unseren wichtigsten Nahrungsmitteln zählt. So ist er z. B. ein Bestandteil des **Eiweiß**. Nur in den Verbindungen, welche die **Pflanzen** mit ihm eingehen, können auch die Tiere ihn verdauen, assimilieren, aber niemals direkt. Da er unter gewöhnlichen Umständen überhaupt keine Verbindung mit den anderen in der organischen Welt verarbeiteten Stoffen eingeht, so war es lange rätselhaft, wie sich die Pflanzen jenen Stickstoff aneigneten, den sie jedenfalls nicht aus der Luft nahmen. Er mußte vielmehr aus der Ackerkrume zu ihnen gelangen, die immer die Stickstoffverbindung **Salpeter** enthält. Salpeter ist in Wasser löslich und kann somit von den Wurzeln aufgenommen werden. Aber seine Bildung blieb anderseits wieder unbekannt. Man sah ihn nur bei Fäulnisprozessen entstehen, bei denen die Reste namentlich von Tieren ihren Stickstoffgehalt abgeben und in jenen Salpeter verwandeln. Dieser Prozeß gelang aber nicht ohne weiteres im Laboratorium, und man hat erst in neuerer Zeit erkannt, daß die Mitwirkung besonderer **Bakterien** zur Stickstoffaufnahme notwendig ist. So sind es also diese als Krankheitserreger so sehr gefürchteten Mikroorganismen, welche uns in Wirklichkeit das Leben erhalten; fehlten sie in dem ewigen Kreislauf der Umgestaltungen des Stoffes, so würde bald alles Leben aufhören, weil der Stickstoff aus jenem Kreislauf ausscheiden und in der toten Natur zu der Regungslosigkeit zurückkehren müßte, in der wir ihn der Luft beigemengt wissen. Die Bakterien sind es, welche sich an die Schwelle des Todes stellen und nach dem Ableben der Organismen jenen für das Leben notwendigen Stoff nicht über diese Schwelle treten lassen, sondern ihn einem neuen Lebenskreislauf zuführen.

Den **Salpeter**, $NaNO_3$, dem die wichtige Rolle der Stickstoffzuführung an die Pflanzen zuerteilt ist, haben wir schon bei den Oxyden erwähnt. Er kann sich in Lagern nur in trockenen Gegenden, z. B. in Wüsten, bilden, weil er an anderen Orten durch das fließende Wasser aufgelöst und entführt oder der Ackerkrume beigemischt wird. Gelangt das salpeterhaltige Wasser im Erdinnern zu Höhlen, so setzt sich das Salz zuweilen ähnlich wie

der Tropfstein ab. So entstanden jedenfalls die Salpeterlager, die man abbaut und zu Dungmitteln verwendet.

Der Salpeter ist auch ein Bestandteil des **Schießpulvers**, das aus 6 Gewichtsteilen desselben, gemischt mit 1 Teil Kohle und 1 Teil Schwefel, zu bestehen pflegt, obwohl es für die verschiedenen Verwendungen noch viele andere Mischungen gibt. Beim Entzünden verbindet sich der Sauerstoff des Salpeters mit der Kohle zu Kohlensäure, der Schwefel mit dem Kali des Salpeters zu Schwefelkalium, das den Pulverdampf verursacht, und der Stickstoff wird frei. Dieser nimmt mit der Kohlensäure einen mehr als tausendmal größeren Raum ein als vorher das Pulver, und daraus erklärt sich die explosive Kraft.

Eine sehr merkwürdige Verbindung des Stickstoffes ist die mit dem Wasserstoff zu NH_3, dem sogenannten **Ammoniak**. Da der Stickstoff hier fünfwertig ist, der Wasserstoff aber nur einwertig, so ist diese Verbindung nicht gesättigt; es bleiben zwei Valenzen des Stickstoffes frei. Bei seiner trägen Natur ist jedoch diese Verbindung trotzdem beständig, wenn sie auch leicht noch weitere Verbindungen eingeht, durch welche sie die freien Valenzen sättigen kann. Auf diese Weise sind wir im stande, andere Verbindungen mit dem Stickstoff herzustellen.



Schematische Darstellung einer Ammoniak-Eismaschine.

Die Verbindung mit dem Wasserstoff geschieht aber keineswegs so einfach, wie etwa zwischen Wasserstoff und Sauerstoff oder Chlor. Man muß die beiden Elemente in dem Augenblicke zusammenbringen, in welchem sie aus anderen Verbindungen frei werden, im sogenannten **status nascendi**. Es zeigt sich ganz allgemein, daß in solchem Zustande die Elemente viel größeres Verlangen haben, sich mit anderen zu verbinden, als wenn sie bereits ganz frei sind. Dies erklärt sich daraus, daß die Gase im freien Zustand ihre Valenzen gegenseitig sättigen (O=O), während im Augenblicke, wo sie aus einer anderen Verbindung scheiden, diese Selbstsättigung noch nicht stattgefunden haben kann, so daß sie stets lieber mit einem anderen Stoff als wieder mit den eigenen Atomen zusammentreten. Selbst der träge Stickstoff macht keine Ausnahme. Macht man also in einem chemischen Gemisch zugleich Wasserstoff und Stickstoff frei, ohne daß noch ein anderer Stoff vorhanden ist, an den sich der Wasserstoff wieder binden könnte, so geht er eine Verbindung mit dem Stickstoff ein, die man **Ammoniak** nennt.

Ammoniak ist ein Gas von dem bekannten stechenden Geruch (**Salmiakgeist**), das sich in Wasser in außerordentlich großen Mengen löst. Ein Raumteil Wasser nimmt über tausend Raumteile jenes Gases bei 0° Wärme, etwas weniger bei höheren Temperaturen auf. In dieser wässerigen Form pflegt es in den Handel zu kommen. Das reine Ammoniakgas wird unter normalem Luftdruck bei —38,5° flüssig; soll es bei gewöhnlicher Temperatur flüssig bleiben, so muß man es unter einem Druck von etwa 10 Atmosphären halten. Befreit man es wieder von diesem Drucke, so siedet es heftig und bindet dadurch viel Wärme (s. S. 173), weshalb man die Ammoniakflüssigkeit zur künstlichen Erzeugung von Eis verwendet. Das Prinzip einer solchen **Ammoniak-Eismaschine** mag hier von Interesse sein. Man denke sich, zwei Gefäße stehen auf doppeltem Wege miteinander in Verbindung, erstens durch eine Pumpe (P in unserer obenstehenden schematischen Darstellung), deren Kolbenbewegung zugleich in dem einen Gefäß eine Zusammenpressung, in dem anderen eine Verdünnung hervorbringt, zweitens durch

eine Röhre, durch welche die Flüssigkeit aus dem einen Gefäß in das andere zurückfließt. Wird in dem ersten Gefäß A die Flüssigkeit unter geringeren Druck gebracht, so verdampft daraus das Ammoniakgas und erzeugt Kälte, die der Umgebung mitgeteilt wird. Gleichzeitig wird auf der anderen Seite, in dem Gefäß B, durch den erhöhten Druck Wärme frei, die man ihm durch Umspülen mit Kühlwasser entzieht, worauf die wieder abgekühlte Ammoniakflüssigkeit nach A zurückfließt. Es ist somit durch die mechanische Kraft der Kolbenstöße ein Kreisprozeß geschaffen, der beständig in A Kälte erzeugt.

Die Auflösung des Ammoniakgases im Wasser ist keine bloße physikalische Mischung. Die Wassermoleküle werden vielmehr gespalten, und ein Wasserstoffatom geht zum Ammoniak über, während sich der Rest des Wassermoleküls, OH, gleichfalls an das neue Molekül bindet. Es entsteht ein Hydrat, wie wir ein solches bereits bei der Schwefelsäure kennen gelernt haben. Auf die Hydrate im allgemeinen kommen wir zurück (S. 458), an dieser Stelle soll uns nur das Ammoniumhydrat interessieren. Die Verbindung findet statt nach der Formel $NH_3 + H_2O = (NH_4)(OH)$. Diese besondere Bezeichnungsweise ist gewählt, um den sogenannten Wasserrest OH hervorzuheben und dadurch die Verbindung als ein Hydrat zu kennzeichnen. Da der Stickstoff fünfwertig ist, bleibt die erste Atomgruppe NH_4 mit einer Valenz noch ungesättigt. Ebenso hat der Wasserrest bei O noch eine freie Valenz; sie ergänzen sich also gegenseitig. Jene Atomgruppe NH_4, die man Ammonium nennt, beträgt sich nun in jeder Weise wie ein Körper, der die chemischen Eigenschaften eines Alkalimetalles hat. Sie verbindet sich, als ob sie wie jene Metalle, Kalium und Natrium, ein einwertiges Element wäre, in gleicher Weise mit allen den Stoffen, mit denen sich auch diese verbinden, und bildet somit Salze. Obgleich es bisher nicht möglich war, einen Stoff herzustellen, der die Zusammensetzung NH_4 zeigt, hat man ihm doch den selbständigen Namen Ammonium und sogar ein besonderes Symbol $Am = NH_4$ gegeben, als ob es sich um ein neues Element handelte. Dieses Am wird ebenso von anderen Elementen vertrieben und ersetzt, als ob es ein Atom Kalium oder Natrium wäre. Wenn wir z. B. unser im Wasser gelöstes Ammoniak, das Ammoniumhydrat, das wir nun mit Am(OH) bezeichnen, mit Salzsäure, HCl, zusammenbringen, so verbindet sich das Chlor mit dem Ammonium und das von der Salzsäure übrigbleibende Wasserstoffatom mit dem Wasserrest OH zu Wasser; es entsteht also aus $Am(OH) + HCl$ nun $AmCl + H_2O$. Das erste Produkt, Ammoniumchlorid, ist der bekannte Salmiak. Ganz ebenso kann man aus Natriumhydrat, Na(OH), und Salzsäure Chlornatrium, Kochsalz, NaCl, herstellen. Es ist diese Erscheinung, daß ein zusammengesetztes Molekül sich wie das eines chemischen Elementes beträgt, sehr bedeutungsvoll, da sie die Möglichkeit in einem konkreten Falle zeigt, daß auch die bisher für chemisch einheitlich gehaltenen Elemente Verbindungen sein können, zusammengesetzte Radikale, die wir bisher nur nicht in ihre Einzelbestandteile zu trennen vermochten. In der organischen Chemie werden wir noch vielen solchen meist im Zusammenhange miteinander bleibenden Atomgruppen begegnen.

Zu der Stickstoffgruppe wird auch der Phosphor gerechnet. Er ist, wie das träge Leitelement der Gruppe, auch fünfwertig, weshalb die chemischen Formeln seiner Verbindungen ganz ähnliche werden wie die der Stickstoffverbindungen. Im übrigen ist aber das chemische Verhalten des Phosphors ein wesentlich anderes. Er ist im Gegensatze zum Stickstoff ein sehr energisch reagierender Stoff und in seinem Wesen etwa dem Schwefel ähnlich, den er an Heftigkeit seiner Wirkungen noch beträchtlich übertrifft. Phosphor schmilzt bereits bei 44° und siedet bei 287°; für den Schwefel sind diese Zahlen 113,5° und 448°. Phosphor ist der am leichtesten

entzündliche, bei normaler Temperatur noch feste Körper, weshalb er auch allgemein zur Feuerbereitung Verwendung findet. Wie der Schwefel zeigt auch der Phosphor allotrope Zustände, die bei ihm besonders merkwürdig sind. Die Eigenschaft der leichten Entzündlichkeit hat nur der sogenannte gelbe oder kristallinische Phosphor, der sehr giftig ist. Er ist zwar nicht in Wasser, aber in anderen Mitteln, z. B. Schwefelkohlenstoff, löslich. Erhitzt man ihn unter Ausschluß von Sauerstoff, damit er sich nicht entzünden kann, bis auf 40—50° unter seinen Siedepunkt, also auf etwa 250°, so geht er in einen ganz anderen Stoff über, der rot, unlöslich, nicht giftig ist und sich nicht mehr allein entzündet. Während man den gelben Phosphor immer unter Wasser aufbewahren muß, damit er sich nicht verflüchtigt oder gar selbst entzündet, kann man den roten oder amorphen Phosphor ruhig an der freien Luft liegen lassen, denn er verändert sich nicht. Nur wenn man ihn in diesem Zustand einen Augenblick bis zu seiner Siedetemperatur erwärmt, geht er plötzlich wieder in den ersten Zustand zurück. Dies ist gewiß sehr merkwürdig, namentlich weil derselbe Prozeß der Wärmezufuhr diesen Körper zuerst in den einen und dann wieder zurück in den anderen Zustand verwandelt.

Von dieser Eigenschaft des Phosphors wird bei den sogenannten schwedischen Zündhölzern Gebrauch gemacht, die selbst zwar keinen Phosphor enthalten, wie ja auch die bekannten Aufschriften ankündigen; wohl aber besteht dafür die Reibfläche aus rotem Phosphor, der, wie wir oben schon sagten, völlig unschädlich und auch in diesem Zustand unentzündlich ist. An der Spitze der Zündhölzchen selbst befindet sich eine Masse, die die Verbrennung kräftig unterstützt, ohne selbst brennbar zu sein, die also reich an Sauerstoff ist, z. B. chlorsaures Kali. Wenn man mit dieser harten Masse auf der absichtlich rauh hergestellten Zündfläche reibt, wird durch die Reibungswärme der rote Phosphor nur an der Reibungsstelle selbst über 290° erhitzt und in gelben verwandelt, der sich leicht entzündet und den Verbrennungsprozeß des Zündhölzchens einleitet. An der Luft verbrennt der gelbe Phosphor langsam von selbst unter der bekannten Leuchterscheinung, von der die ihr nur äußerlich ähnlichen Phosphoreszenzerscheinungen ihren Namen haben. Die leuchtenden giftigen Dämpfe sind phosphorige Säure, P_2O_3. Bei der schnellen, vollständigen Verbrennung entsteht Phosphorsäure, Phosphorpentoxyd, P_2O_5. (Alle diese Verbindungen sind hier immer als Anhydride angeführt.)

Phosphor ist nächst den vier Organogenen Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenstoff, Wasserstoff und dem Schwefel das verbreitetste und notwendigste Element in der organischen Natur, die ohne ihn nicht auskommen könnte. Unsere Knochen bestehen aus phosphorsaurem Kalk, und aus ihnen sowohl wie dem Urin wurde das Element früher ausschließlich gewonnen. Es kommt aber auch in Verbindungen im Mineralreiche vor; die Phosphate dienen als Dungmittel, um den Pflanzen die ihnen unbedingt nötigen Mengen an Phosphor wieder zuzuführen.

Das sehr reaktionsfähige Element geht eine Menge von Verbindungen ein, von denen wir zum Teil schon gesprochen haben. Außer einer ganzen Reihe von Oxyden gibt es Sulfide und Chloride des Phosphors. Ferner ist als eine interessante Verbindung der Phosphorwasserstoff zu erwähnen, H_4P_2, der sich an der Luft von selbst entzündet und dabei zu Phosphorsäure und Wasser verbrennt.

Dem Phosphor ist das Arsen wiederum sehr ähnlich, so daß Phosphor und Arsen eine Gruppe mit abgestufter Reagenzfähigkeit zu bilden scheinen. Dabei hat das Arsen die merkwürdige Eigenschaft, daß sein Schmelz- und Siedepunkt zusammenfallen. Es geht sofort von dem festen in den gasförmigen Zustand über, es sublimiert, wobei es an den Wänden des Verdampfungsgefäßes einen schwarzglänzenden Arsenspiegel bildet.

Mit dem Phosphor teilt das Arsen beim Verbrennen seinen eigentümlichen Geruch und seine giftigen Eigenschaften, die bei ihm noch weit gefährlicher sind als bei dem Phosphor. In Verbindung mit anderen Metallen kommt Arsen sehr häufig vor, es ist z. B. ein fast ständiger Begleiter des Zinks. Doch geht es weniger leicht Verbindungen ein als der Phosphor und kommt darum auch im gediegenen Zustand in der Erdrinde vor, Phosphor dagegen nicht, da sich ja selbst der künstlich hergestellte nur kurze Zeit hält. Arsen hat metallischen, bleigrauen Glanz und auch eine gewisse metallische Härte, obgleich es recht spröde ist; es könnte also als ein Übergang zu den leichten Metallen gelten.

Es gibt arsenige und Arsensäure, Sulfide und Chloride des Arsens, sowie, dem Phosphorwasserstoff entsprechend, Arsenwasserstoff, AsH_3, eins der giftigsten Gase, das schon manche Opfer gefordert hat.

Noch eine Stufe tiefer in der Reaktionsfähigkeit führt uns das gleichfalls fünfwertige Antimon, dessen Schmelzpunkt bei 430° liegt, und das erst bei etwa 1500° verdampft. Es hat einen weißen Metallglanz und noch größere Härte und Sprödigkeit als Arsen, kommt in der Natur meist in Verbindung mit Schwefel vor und gibt gleichfalls antimonige und Antimonsäure, Sb_2O_3 und Sb_2O_5, die in der atomistischen Zusammensetzung genau mit der Salpeter-, Phosphor- und Arsensäure übereinstimmen.

Antimon kommt auch gediegen, aber meist als Erz (Grauspießglanzerz) vor und geht mit Metallen sogenannte Legierungen ein, auf deren allgemeine Eigenschaften wir später zurückkommen. Mit Blei gemischt gibt es das sogenannte Hartblei, das für die Herstellung der Buchdrucklettern verwendet wird, während aus Zinn und Antimon das bekannte Britanniametall besteht.

Endlich mag noch erwähnt werden, daß man Antimon früher für ein dreiwertiges Element hielt und zu den Metallen zählte, mit denen es in der Tat sehr viele ähnliche Eigenschaften hat. Die modernen theoretischen Anschauungen machten manche ähnliche Umstellungen in der Reihe der Elemente nötig.

e) Kohlenstoff.

Es ist allgemein bekannt, daß der Kohlenstoff in sehr verschiedenen, allotropen Zuständen auftritt, und zwar als eigentliche Kohle, als Graphit und als Diamant. In allen drei Formen ist er bei den uns zugänglichen Hitzegraden unschmelzbar, noch viel weniger zu verflüchtigen und unterscheidet sich dadurch von allen anderen Stoffen. Kohle und Graphit sind schwarz und undurchsichtig, der Diamant in seiner reinsten Form wasserhell. Er und der Graphit sind kristallinisch, dieser aber blätterig weich, so daß er den Schreibstoff der Bleistifte hergibt, während der Diamant der härteste aller Stoffe ist. Kohle verbindet sich bei leicht erreichbaren Hitzegraden mit dem Sauerstoff und verbrennt vollständig; Graphit ist so schwer zu verbrennen, daß man feuerfeste Tiegel aus ihm formt, und ebenso ist der Diamant nur sehr schwer brennbar; das Produkt der Verbrennung ist aber qualitativ und quantitativ dasselbe wie bei der Verbrennung eines gleich schweren Stückes Kohle.

Man kann wohl den Diamant durch Glühen unter Luftabschluß in graphitähnlichen Zustand und schließlich in Kohle verwandeln, leider aber nicht umgekehrt die Kohle in Diamant, oder doch nur in ganz minimalen Mengen, worauf wir sogleich zurückkommen. Kohle ist nicht nur, wieder mit der eben angedeuteten Einschränkung, unschmelzbar, sie ist auch unlöslich in irgend einem Mittel, weshalb man sie nicht wieder auskristallisieren kann. Wie der Diamant





Die Diamantgrube ‚Old de Beers' bei Kimberley.
Nach einer Photographie.

in der Natur entstanden ist, bleibt vorläufig noch ein Rätsel, wenn es auch in letzter Zeit gelungen ist, kleine Diamanten künstlich zu erzeugen. Aus dem Verhalten des Eisens zum Kohlenstoff bei der Stahlbereitung (S. 438) konnte man vermuten, daß bei der Verbindung der beiden Elemente zeitweilig genügend große Hitzegrade entstehen, um kleine Mengen von Kohlenstoff flüssig zu machen, die alsbald wieder die Verbindung mit dem Eisen zu Stahl eingehen. Wenn man diesen Prozeß plötzlich unterbricht und die Masse unter einen starken Druck bringt, der eine sehr schnelle Kristallisation veranlaßt, verdichtet sich wirklich die Kohle zu kleinen Diamanten. Dies wird ausgeführt, indem man Eisen, mit Kohlenstaub vermengt, in weißglühenden Fluß bringt und rasch in kaltes Wasser gießt, wobei sich die Masse durch die plötzliche Abkühlung sehr stark zusammenzieht und ihre inneren Teile einem gewaltigen Druck aussetzt. Die Eisenmasse wird dann in einer Säure aufgelöst, in der der Diamantstaub zurückbleibt. Auf ganz andere Weise haben J. Friedländer und von Haßlinger 1902 Diamanten hergestellt, indem sie die Kohle mit vulkanischen Gesteinen in Schmelzfluß brachten. Haßlinger wendete hierbei das neue Goldschmidtsche Schmelzverfahren an, bei dem die große Affinität des Magnesiums und Aluminiums zum Sauerstoff benutzt wird, um sehr große Hitzegrade zu erzielen. Auf diese Weise wurden Diamanten künstlich hergestellt, die allerdings nicht größer als 0,05 mm waren. Praktisch nutzbar zu machen sind diese Verfahren einstweilen noch nicht. Wir haben schon erwähnt, daß man solche kleinen Diamanten gelegentlich auch in Eisenmeteoriten findet. Es ist nicht unmöglich, daß sie einem ähnlichen Prozeß ihr Entstehen verdanken, wie wir ihn zuerst geschildert haben, während die in der Erde gefundenen sich aus dem Magma vielleicht in der von Friedländer künstlich dargestellten Weise herausgebildet haben. Der Diamant liegt, z. B. in Indien, Brasilien und Australien, vielfach mit Gold zusammen lose in angeschwemmtem Geröll und ist offenbar von seiner ursprünglichen Lagerstätte durch das Wasser hierher getragen worden; aus kleinen anhaftenden Bruchstücken kann man auf das Muttergestein schließen. Schließlich entdeckte man ein solches Muttergestein in dem eigentümlichen biegsamen Schiefer Brasiliens, dem Itakolumit, der aber über die Entstehungsweise des Diamanten keine Auskunft zu geben vermag. In den berühmten Diamantgruben Südafrikas, in Kimberley u. s. w. (s. die beifolgende Tafel), wird der Diamant aus dem „blue ground“, einem vulkanischen Tuff, herausgewaschen. Ein derartiger Stein ist auf der farbigen Tafel bei S. 434 abgebildet, während die Tafel bei S. 501 einige besonders berühmte Diamanten in ihrer natürlichen Größe und mit ihrem künstlichen Facettenschliff darstellt.

Kohle bildet sich beim Destillationsprozeß organischer Substanzen unter Anwendung von Wärme und Abschluß der Luft, an der ja die Kohle wieder zu Kohlensäure verbrennen würde. Bei Bereitung der Holzkohle in den Meilern geschieht dies dadurch, daß man das aufgeschichtete Holz mit einer Erdschicht umgibt, die der Luft nur wenig Zutritt gewährt. Nachdem man den Meilerhaufen entzündet hat, findet eine unvollkommene Verbrennung statt. Denn wegen der geringen Luftzufuhr kann sich der Kohlenstoff des verbrennenden Holzes nur mit je einem Atom Sauerstoff zu dem giftigen Kohlenoxyd (CO) verbinden, und die dadurch entstehende langsame Erwärmung vertreibt aus dem nicht zur Verbrennung kommenden Holz zwar alle übrigen Bestandteile, läßt aber die Kohle zurück. Prinzipiell in derselben Weise ging die Bildung der Steinkohle vor sich, nur daß hier der Druck der über die vegetabilischen Reste sich hinlagernden Erdschichten die Wärme für den Destillationsprozeß hergab. Die Destillationsprodukte blieben zum großen Teil unter die verkohlten Pflanzenreste gemischt, die wir heute aus der Steinkohle, z. B. bei der Gasfabrikation, als Teer und andere Nebenprodukte entfernen

können. Aus diesem schmutzigen Teer zaubert heute der Chemiker eine Fülle der wunderbarsten Farbstoffe hervor.

Bei solchen Einwirkungen wie dem auf ihr lastenden Druck der Gesteinsmassen behält die übrigbleibende Kohle die Struktur der ursprünglichen organischen Substanz bei, so daß man z. B. bei einer Holzkohle die Form des verbrannten Holzes, die Jahresringe des Stammes u. s. w. erkennen kann. Da aber ungefähr drei Viertel der Holzsubstanz durch die Verbrennung entführt worden sind, während die Raumausdehnung des ganzen Stückes dieselbe blieb, ist die Holzkohle noch viel poröser geworden, als es das Holz bereits war. Infolgedessen übt sie eine sehr große Haarröhrchenanziehung aus (s. S. 125), die sie befähigt, Flüssigkeiten begierig in sich einzuziehen und Gase bis zum Hundertfachen ihres eigenen Gewichtes zu absorbieren. Durch die sehr große Annäherung, welche die Moleküle solcher Stoffe dabei erfahren, gehen sie unter Umständen chemische Verbindungen miteinander ein, die im freien Zustande nicht mehr möglich wären. Die Porosität der Holzkohle wird bekanntlich auch zu Filtrierzwecken benutzt, weil sie noch so kleine feste Beimengungen, ebenso faulige Substanzen nicht durchgehen läßt, so daß schlechtes Wasser in trinkbares verwandelt werden kann.





Struktur der Flamme.

Da wir vorher von einer unvollständigen Verbrennung sprachen, wollen wir auch einige Worte über die vollständige Verbrennung einfügen. Wir nennen einen Körper vollständig verbrannt, wenn er völlig mit Sauerstoff gesättigt ist. Das Kohlenoxydgas ist dies nicht, wohl aber die Kohlensäure, die keinen weiteren Sauerstoff mehr aufnimmt. Um eine vollständige Verbrennung herbeizuführen, muß stets Sauerstoff in genügender Menge zugegen sein; aber es ist nicht notwendig, daß die Verbrennung stets mit Flammenerscheinung vor sich geht, während umgekehrt die Flamme immer eine vollständige Verbrennung anzeigt. Bei ungenügendem Luftzutritt kann sie nicht entstehen, weshalb man für Öfen, Lampen u. s. w. die verschiedenartigen Einrichtungen hat, welche der Flamme „Zug" geben. Es sind uns bereits Stoffe bekannt, welche sich an der Luft von selbst entzünden, andere müssen zuvor angezündet werden. Dies zeigt uns, daß der Oxydationsprozeß bei den verschiedenen Körpern erst über gewissen Temperaturen beginnt, denn für alle chemischen Reaktionen bestehen bestimmte Temperaturgrenzen, worauf wir noch in dem diese Erscheinung behandelnden Kapitel 5 zurückkommen. Ist die kritische Temperatur des betreffenden Stoffes nur an einer kleinen Stelle überschritten, so entwickelt meist der Oxydationsprozeß selbst eine genügende Wärme, um den Stoff mindestens auf jener Anfangstemperatur zu erhalten: der Verbrennungsprozeß dauert also fort.

Das Leuchten der Flamme selbst ist eine Glüherscheinung der bei der Oxydation gebildeten Gase oder fester, in der Flamme entstandener weißglühender Teilchen. Dementsprechend zeigen die Flammen entweder die hellen Linien ihres Gases oder, z. B. eine Kerzenflamme, nur ein kontinuierliches Spektrum. An einer Kerzenflamme erkennen wir deutlich drei Regionen (s. die obenstehende Abbildung). Der innere Teil der Flamme ist dunkel; er enthält das sich aus der Kerzensubstanz durch die Hitze der Flamme verflüchtigende Gas noch unverbrannt. Wenn man in diesen Teil das Ende einer feinen Glasröhre bringt, die das Gas aufsaugt, so kann man es ansammeln und als „Leuchtgas" nach Belieben später verbrennen.

Der diesen dunkeln Kern umschließende Mantel ist der eigentliche leuchtende Teil der Flamme. Hier beginnt erst der Oxydationsprozeß, und darum ist auch dieser Teil wesentlich heißer als der innere. Das Gas enthält eine große Menge feinst verteilter Kohle, die durch die entwickelte Hitze zunächst ins Glühen kommt, ohne sofort mit zu verbrennen, und die weißglühenden Kohlenteilchen geben der Flamme das Licht. Diesen Teil umgibt nun noch ein weiterer Mantel, der wieder sehr wenig leuchtet, aber noch heißer ist als der leuchtende. In ihm verbrennt auch die Kohle. Ist die Luftzufuhr nicht genügend, so entwickelt die Flamme keine genügende Hitze, um die Kohle noch mit zu verbrennen, und die Flamme rußt, d. h. sie gibt die Kohle in feinster Verteilung zurück. Führt man dagegen der Flamme mehr Sauerstoff zu, als zur Entwickelung einer leuchtenden Flamme nötig ist, so kann die Kohle sofort mit verbrennen; die Flamme leuchtet nicht mehr, oder doch nur mit dem Licht ihres glühenden Gases, wird aber wesentlich heißer. Auf diesem Prinzip beruht der bekannte Bunsenbrenner, der in Laboratorien und jetzt auch zu Gaskochern im gewöhnlichen Leben angewendet wird.

Von den uns als anorganische Derivate interessierenden Kohlenstoffverbindungen haben wir bereits im vorangehenden gesprochen.

Wir führen hier nur noch eine Verbindung des Kohlenstoffes an, die eigentlich in die organische Chemie zu rechnen ist, aber so viele Ähnlichkeiten mit den Halogenen zeigt, daß man sie in gleicher Weise als ein Pseudoelement wie das Ammonium auffassen kann, nur mit dem wichtigen Unterschiede, daß man diese Verbindung wirklich hergestellt hat. Es ist das Cyan, CN (als beständiges Gas C_2N_2), also die Vereinigung von einem Atom Kohlenstoff mit einem Atom Stickstoff, ein sehr giftiges Gas, das bei -21^0 flüssig, bei -34^0 fest wird. Diese Verbindung verhält sich chemisch ganz so wie die einfachen Stoffe Chlor, Brom, Jod und Fluor. Da der Kohlenstoff vierwertig, der Stickstoff fünfwertig ist, bleibt bei der Verbindung CN eine Valenz ungesättigt; Cyan ist also einwertig wie die Halogene. Man hat auch ihm wie dem Ammonium eine einfache Buchstabenbezeichnung gegeben, wie den eigentlichen Elementen; statt CN schreibt man Cy. Dieses Pseudoelement geht alle Verbindungen ein wie das Chlor und bildet mit den Metallen Salze und Säuren. Von den letzteren ist der Cyanwasserstoff, CyH, die bekannte und berüchtigte Blausäure, die in Fruchtkernen auftritt und den Bittermandeln ihren Geschmack gibt. Unter den Verbindungen des Cyans mit den leichten Metallen nennen wir das Cyankalium, KCy, und das Blutlaugensalz, das eine Verbindung des Cyankalis mit Eisen ist; gelbes Blutlaugensalz hat die Formel K_4FeCy_6, rotes Blutlaugensalz hat ein Kaliumatom weniger, K_3FeCy_6. Wir haben es hier schon mit einer Verbindung von vier Elementen zu tun, während wir uns bisher in der Hauptsache nur mit „binären" Verbindungen beschäftigten.

Verbindet sich das einwertige Cyan mit einem Atom Schwefel, so wird zwar seine Valenz gesättigt, aber beim zweiwertigen Schwefel bleibt nun wieder eine Valenz offen. Auf diese Weise entsteht ein neues Radikal, das man Rhodan genannt hat (CyS), und das gleichfalls als ein einwertiges Pseudoelement betrachtet werden kann. Auch dieses bildet Salze wie die eigentlichen Halogene, unter anderem auch mit dem Ammonium, zu dem dem Photographen wohlbekannten Rhodanammonium, AmCyS, oder ausgeschrieben $(NC)S(NH_4)$. Es mag hier interessieren, von dieser ersten, etwas komplizierteren Verbindung, der wir begegnen, und die, wie gesagt, schon in das Gebiet der organischen Chemie gerechnet wird, die Strukturformel kennen zu lernen, die folgendermaßen aussieht: $C\equiv N-S-N\begin{smallmatrix}H\\ <^{H}_{H}\\ H\end{smallmatrix}$. Wir haben hier eine Verbindung

von vier Elementen, von denen je eines 1=, 2=, 4= und 5wertig ist. Die Verbindung ist vollkommen gesättigt. Die anderen Kohlenstoffverbindungen werden im Kapitel der organischen Chemie (S. 467 und folgende) besprochen.

f) Hydrate und Oxysalze.

Über den Wasserstoff selbst haben wir bereits das Hauptsächlichste bei Besprechung seiner Verbindung mit dem Sauerstoff zu Wasser gesagt. Wir haben auch von den Säurehydraten und ihren Anhydriden gesprochen und wissen, daß die Atomverbindung OH der Wasserrest (auch Hydroxyl) heißt. Dieser geht ähnlich wie Ammonium ($NH_4 = Am$) und Cyan ($CN = Cy$), als ob er ein einwertiges Element wäre, Verbindungen ein, die man Hydrate nennt. Es entstehen drei Arten von Verbindungen, die Säuren, Basen und Salze, die in diesem Falle Oxysalze genannt sind.

Von den Säuren haben wir schon einige kennen gelernt. Aus Schwefelsäureanhydrid, SO_3, wurde durch Hinzufügung von Wasser, H_2O, die eigentliche Schwefelsäure, H_2SO_4, hergestellt, die wir besser $SO_2(OH)_2$ schreiben, wenn wir ihren Charakter als Hydrat hervorheben wollen. Die Strukturformel der Schwefelsäure wurde schon auf S. 432 angegeben. Nimmt man ihr die beiden Wasserstoffatome, so bleibt SO_4 als sogenannter Schwefelsäurerest, bei dem zwei Valenzen zur Sättigung mit anderen Elementen übrigbleiben.

Entsprechenden Verhältnissen begegnet man bei der Salpetersäure und anderen Oxysäuren.

Die Anhydride sind im stande, sich direkt mit dem Wasser zu Hydraten umzuwandeln. Unter diesen ist der Kalk das bekannteste Beispiel. Gebrannter Kalk zieht Wasser stark an und wird dadurch „gelöscht", wobei er eine beträchtliche Hitze entwickelt. Dabei wird aus dem Kalk (Calciumoxyd, CaO) und dem Wasser (H_2O) Calciumhydrat, $Ca(OH)_2$. Da Calcium zweiwertig ist, der Wasserrest, OH, nur einwertig, weil bei ihm noch eine Sauerstoffvalenz zu sättigen ist, müssen sich zwei Wasserreste mit einem Atom Calcium verbinden. Durch Ausglühen, Calcinieren, kann man das wasserfreie Oxyd wieder herstellen und diesen Kalk dann abermals löschen.

Ebenso verbinden sich Kalium und Natrium direkt mit dem Wasser zu Hydraten. Das Kaliumhydrat, $K(OH)$, heißt auch Ätzkali, das Natriumhydrat, $Na(OH)$, Ätznatron. Die ätzenden Eigenschaften dieser sogenannten Laugen, die man zum Zersetzen namentlich tierischer Substanzen benutzt, sind bekannt. Wir kommen auf ihre Anwendungen bei den organischen Verbindungen zurück.

Löst man ein schweres Metall in einer Säure, so stellt sich, jedoch nicht bei allen Metallen, da einige gegen gewisse Säuren indifferent bleiben, das Metall an die Stelle des Wasserstoffes, der als freies Gas entweicht; das Metall verbindet sich also mit dem Säurerest. Zum Beispiel gibt Eisen in Schwefelsäure: $Fe + H_2SO_4 = FeSO_4 + H_2$. Das hierbei entstehende Oxysalz ist der bekannte Eisenvitriol, auch schwefelsaures Eisen oder, nach der heute üblichen Bezeichnung, Ferrosulfat genannt. Auf dieselbe Weise entsteht der Kupfervitriol, schwefelsaures Kupfer, Cuprisulfat, $CuSO_4$, indem wieder der freie Wasserstoff entweicht. Es gibt auch Zinkvitriol und viele andere Verbindungen von Metalloxyden mit Schwefel. Die Oxysalze bilden meist schöne Kristalle.

Bei der Kristallisation bindet sich an die hier aufgeführten Atomgruppen noch Wasser, das sogenannte Kristallwasser, mit dem wir uns in dem Kapitel 4 über den Kristallisationsprozeß noch besonders beschäftigen. Wir geben also durchweg die chemischen Formeln der Mineralien, ohne den sonst üblichen Zusatz für ihr Kristallwasser anzufügen.

Auch bei der Auflösung von Metallen in Wasserstoffsäuren wird der Wasserstoff frei. Die dabei entstehenden Salze sind die Haloide. Salzsäure und Zink bilden einfach Zinkchlorid und Wasserstoff. In der Formel haben wir zu setzen: $2HCl + Zn = ZnCl_2 + H_2$.

Zur Bezeichnung der Oxysalze ist zu sagen, daß man der Einheitlichkeit wegen die alten Bezeichnungen als schwefel-, salpeter-, kohlensaure Salze aufgegeben hat. Heute bezeichnet man die aus den niederen Oxydationsstufen (der schwefligen, salpetrigen u. s. w. Säure) entstehenden Salze mit Sulfit, Nitrit und nennt die aus den eigentlichen Säuren (Schwefelsäure, Salpetersäure, Salzsäure, Kieselsäure) gebildeten Salze Sulfate, Nitrate, Silikate. Zu diesen beiden Gruppen gehören unter anderen folgende bekannte, im Haus verwendete Salze, deren chemische Bezeichnung beigefügt ist; Pottasche: kohlensaures Kalium oder Kaliumkarbonat, K_2CO_3; Soda: kohlensaures Natron oder Natriumkarbonat, Na_2CO_3; doppeltkohlensaures Natron, der bekannte Teil des Brausepulvers: Natriumbikarbonat, $NaHCO_3$; unterschwefligsaures Natron, das Fixiersalz des Photographen: Natriumhyposulfit, $Na_2S_2O_3$; schwefligsaures Natron, ein Bestandteil des photographischen Entwicklers: Natriumsulfit, Na_2SO_3; das Glaubersalz, schwefelsaures Natron: Natriumsulfat, Na_2SO_4; Gips, schwefelsaures Calcium: Calciumsulfat in wasserfreiem Zustande, $CaSO_4$; Bleiweiß, kohlensaures Blei: Bleikarbonat, $PbCO_3$; Höllenstein, salpetersaures Silber: Silbernitrat, $AgNO_3$; Bleizucker, essigsaures Blei: Bleiacetat, $PbC_4H_6O_4$ (eine organische Verbindung).

Bei den Hydraten unterscheidet man die aus den niederen Oxydationsstufen abgeleiteten von den höheren durch Einfügung eines o und eines i nach den lateinischen Bezeichnungen der Metalle. Das aus dem Eisenoxydul, FeO, abgeleitete Hydrat, $Fe(OH)_2$, heißt Ferrohydrat, das aus dem Eisenoxyd, Fe_2O_3, erhaltene, $Fe(OH)_3$, Ferrihydrat. Aluminiumhydrat ist die Tonerde, $Al(OH)_3$, Magnesiumhydrat die Magnesia, $Mg(OH)_2$; die zu medizinischen Zwecken verwendete Magnesia ist kohlensaures Magnesium, aus dem durch Erhitzen Magnesiumoxyd, gebrannte Magnesia, wird; aus dieser wieder erhält man das Hydrat durch Verbindung mit Wasser, ähnlich wie beim Kalk. Auch Grünspan ist ein Hydrat: Cuprihydrat, $Cu(OH)_2$.

g) Leichtmetalle.

Unter der Gruppe der Leichtmetalle ist das Kalium das charakteristischste Element, und wir haben bereits eine ganze Reihe seiner Verbindungen kennen gelernt. Es sieht weißglänzend wie Silber aus, ist aber leichter als Wasser, denn sein spezifisches Gewicht ist 0,87. Es schmilzt bei 62,5° und siedet bei 720°. An der Luft oxydiert es sofort und verbrennt im Wasser mit einer Flamme, weshalb man es in einer Flüssigkeit aufbewahren muß, die keinen Sauerstoff enthält, z. B. in Petroleum.

Das Natrium ist dem Kalium in jeder Hinsicht sehr ähnlich, namentlich dem Ansehen nach kaum von ihm zu unterscheiden. Sein spezifisches Gewicht ist ein wenig größer und fast dem des Wassers gleich (0,97). Der Schmelzpunkt (95°) und der Siedepunkt (900°) liegen beide etwas höher als beim Kalium; das Natrium ist deshalb weniger reaktionsfähig, muß indes gleichfalls unter Petroleum aufbewahrt werden, um vor Oxydation geschützt zu sein. So weich sind diese Metalle, daß sie sich kneten lassen.

Das Calcium ist bereits merklich schwerer als Wasser; sein spezifisches Gewicht ist 1,58. Obwohl es sich gleichfalls direkt mit dem Wasser durch Entfernung des Wasserstoffs zu Calciumhydrat verbindet, ist es doch wesentlich widerstandsfähiger als die beiden vorerwähnten

Leichtmetalle. Es ist ein glänzend gelbliches, nicht mehr knetbares, aber leicht zu dehnendes Metall, das etwa bei Rotglut zu schmelzen beginnt.

Magnesium mit dem spezifischen Gewicht 1,74 ist wenig schwerer als Calcium. Es ist silberweiß, biegsam, schmilzt bei ca. 450°, verflüchtigt sich bei ca. 900° und oxydiert sich nicht mehr leicht. Daß das Magnesium nach genügender Erhitzung leicht mit glänzendem Lichte verbrennt, ist bekannt; man bedient sich seiner darum zu „Magnesiumblitzen" bei photographischen Aufnahmen und zu den schön weiß leuchtenden Fackeln.

Aluminium ist heute ein bekanntes Metall, während es vor einem Jahrzehnt noch zu denjenigen Stoffen gehörte, die man nur in kleinen Mengen im Laboratorium zu sehen bekam, wie das Kalium, Natrium und Calcium, während doch auch deren Verbindungen zu den verbreitetsten Stoffen auf der Erde gehören. Der Grund davon ist in der großen Unbeständigkeit der drei letztgenannten Metalle im reinen Zustand zu suchen. Das Aluminium dagegen ist, einmal als Metall gewonnen, sehr beständig, so daß selbst Schwefel- und Salpetersäure es unter gewöhnlichen Umständen nicht angreifen; nur die Salzsäure vermag dies. Es ist ein ziemlich hartes, weißglänzendes, zinnartiges Metall, das bei 625° schmilzt. Angezündet, verbrennt es ebenso wie das Magnesium mit glänzender Flamme, doch etwas schwerer.

Zu den Gruppen des Kaliums, des Calciums und Aluminiums gehören noch eine Anzahl von seltenen Metallen, die in ihrem chemischen Verhalten große Ähnlichkeit mit jenen leichten Metallen haben, selbst aber teilweise recht schwer sind, z. B. das Thallium, das Yttrium und Thorium; letzteres ist sogar nächst dem Uran der schwerste Stoff, den wir kennen.

Über das Vorkommen der Leichtmetalle in der Natur und ihre wichtigsten Verbindungen wurde bereits bei Besprechung der Oxyde, Sulfide u. s. w. (S. 427 ff.) das Notwendigste gesagt.

h) Die Schwermetalle.

Zink könnte man als ein Zwischenglied von den Leichtmetallen zu den schweren betrachten. Es ist dem Magnesium ähnlich und schmilzt bereits bei etwa 420°. Nehmen wir das Quecksilber aus, so ist es das einzige schwere Metall, das sich in größeren Mengen leicht verdampfen läßt, da es schon bei etwa 930° siedet. Zink ist, abweichend von den übrigen Metallen der Eisengruppe, zweiwertig, gleicht also auch in dieser Hinsicht dem Magnesium; nur ist es nahezu ebenso schwer wie Eisen. Das äußere Ansehen des Zinks ist bekannt. Gewöhnlich ist es ein sehr sprödes, brüchiges Metall, so daß man es bis gegen den Anfang des 19. Jahrhunderts fast gar nicht zu verwenden wußte. Erst als man entdeckte, daß es, auf etwa 150° erhitzt, seine Sprödigkeit verliert und sich nun in Platten walzen läßt, hat es allgemeinen Gebrauch gefunden. Es ist eine recht merkwürdige molekulare Eigenschaft des Zinks, daß es diese Dehnbarkeit nur innerhalb enger Temperaturgrenzen zeigt, während es auch im wärmeren Zustande wieder brüchig wird.

Wollen wir in der eigentlichen Eisengruppe von den leichteren zu den schwereren Metallen übergehen, so haben wir zunächst das Chrom zu erwähnen, dessen spezifisches Gewicht 6,9 gegen etwa 7,5 des Eisens ist. Immerhin sehen wir, daß zwischen den Leichtmetallen und diesem leichtesten Schwermetall eine große Lücke bleibt. Chrom ist sehr hart und fast unschmelzbar, ritzt Glas und ist schlicht grau, so daß es von der Farbenpracht vieler seiner Verbindungen, von der es seinen Namen (chromos, griech. = farbig) hat, nichts erkennen läßt. Seine Wertigkeit schwankt zwischen zwei und drei Valenzen. Es ist im Gegensatz zu anderen eisenähnlichen Metallen nicht magnetisierbar und kommt in der Natur nur in Verbindungen vor, ist nicht allzuselten und findet sich auch mit den anderen eisenähnlichen Metallen in Meteoriten.

Unter den Verbindungen des Chroms ist das chromsaure Blei, $PbCrO_4$, Chromgelb, als Malerfarbe bekannt. Das doppeltchromsaure Kali, Kaliumbichromat, $K_2Cr_2O_7$, benutzen die mit Kohledruck arbeitenden Photographen, denn es hat die merkwürdige Eigenschaft, mit gewissen Pflanzenstoffen, Papier, Gelatine u. s. w. lichtempfindlich zu werden.

Vom Eisen haben wir an dieser Stelle nicht viel mehr zu sagen, da sein Vorkommen und seine Verbindungen bereits im Vorangegangenen (S. 437 ff.) behandelt wurden, während die allgemeinen Eigenschaften dieses verbreitetsten aller Metalle als Element genügend bekannt sind. Es sei nur noch bemerkt, daß das Eisen das einzige Schwermetall ist, dem man auch in der organischen Welt begegnet; unser Blut enthält verhältnismäßig große Mengen von Eisen als durchaus notwendigen Bestandteil, so daß man blutarmen Menschen Eisen in gelöster Form zuführt, das dann im Körper blutbildend wirkt. Hierfür finden vielfach die natürlichen sogenannten Stahlwässer Verwendung, die man besser Eisenwässer nennen würde, aber mit diesen unterscheidenden Namen bezeichnet hat, weil sie die zur Lösung des Eisens notwendige Kohlensäure enthalten. Die Beimengungen der Mineralwässer sind also Verbindungen von Eisen und Kohlenstoff wie das Stahl.

Kobalt und Nickel sind dem Eisen ähnlicher als alle anderen dieser Gruppe angehörigen Metalle und sind auch, allerdings in geringerem Maß als das Eisen, magnetisierbar. Beide sind etwas schwerer als Eisen, ihr spezifisches Gewicht ist 8,5, beziehungsweise 8,9. Ihren Namen tragen sie von den neckischen Berggeistern (Kobalt kommt von Kobold, wie die Bergleute in der Tat diesen Stoff nannten), denn ihre Erze sind den Silbererzen ähnlich, während sie, wie Silber im Ofen behandelt, zu einer grauen Asche werden. Man meinte also, daß hier die Berggeister im Spiele seien, um die Menschen zu äffen. Daß Nickel einen silberähnlichen Glanz hat, weiß jedermann, seit die Nickelmünzen eingeführt sind, doch enthalten diese nur 1/4 Nickel und 3/4 Kupfer. Kobalt und Nickel sind schwerer oxydierbar als Eisen, daher überzieht man viele Geräte mit Nickel, um sie vor Rost zu schützen. Kobalt gibt schöne blaue Salze, die auch zu Farbstoffen verwendet werden, Nickel grüne.

In die Reihe fast ständiger Eisenbegleiter gehört auch das Mangan, dessen spezifisches Gewicht zwischen dem des Eisens und des Kobalt liegt (8,0). Es ist nächst dem Platinbegleiter Iridium das am schwersten schmelzende Metall, denn sein Schmelzpunkt liegt etwa bei 1900°. Trotz dieser Schwerschmelzbarkeit, mit der seine große, sogar Stahl ritzende Härte zusammenhängt, ist Mangan viel leichter oxydierbar als Eisen, daher ein unedleres Metall und rein nicht technisch verwendbar. Seine Legierungen dagegen sind für verschiedene Verwendung sehr wertvoll.

Zur Gruppe des Eisens rechnet man noch das merkwürdige Uran, das uns schon wegen seiner rätselhaften Strahlen (Uran- oder Becquerelstrahlen) lebhaft beschäftigt hat. Wir erfuhren aber in dem diesen Erscheinungen gewidmeten Kapitel 10, daß sie wahrscheinlich gar nicht dem Uran selbst, sondern einem oder mehreren, im freien Zustande noch unbekannten Elementen (Radium x.) zukommen, die mit dem Uran vergesellschaftet sind. Das Uranmetall sieht ungefähr wie Eisen aus, ist aber mehr als noch einmal so schwer; sein spezifisches Gewicht erreicht fast das des Goldes, und außer ihm ist nur noch Platin mit seinen Nebenmetallen schwerer. Das Atom des Urans ist das schwerste überhaupt von allen bekannten Stoffen, sein Atomgewicht ist 240. Seine Oberfläche verwandelt sich an der Luft in ein Oxyd, und beim Erhitzen verbrennt das Metall. Diese verhältnismäßig leichte Oxydierbarkeit, die sich auch in seinem Verhalten den Säuren gegenüber ausdrückt, teilt das Uran mit den übrigen Metallen der Eisengruppe, die deshalb als unedle Metalle bezeichnet werden. Das Uran wird in der ziemlich

seltenen Pechblende gefunden und nur in Joachimsthal im böhmischen Erzgebirge verarbeitet. Verschiedene Uransalze finden als Farbstoffe, namentlich für die Glas- und Porzellanmanufaktur, Verwendung. Uranoxydul, UO_2, liefert eine feuerbeständige, schwarze Porzellanfarbe, $Na_2U_2O_7$; Natriumuranat ist schön gelb, und mit ihm wird das gelbe, grünlich fluoreszierende Uranglas fabriziert.

Blei, der erste Repräsentant seiner Gruppe, bildet wieder ein Übergangsglied von der Eisengruppe. Es ist ein unedles Metall, weil es sich immer noch, wenn auch nur am Feuer, leicht oxydiert. An der Luft freilich ist es sehr widerstandsfähig und ebenso in den Säuren; daß man die Schwefelsäure aus diesem Grund in den Bleikammern gewinnt, wissen wir. Es ist wegen dieser Beständigkeit und wegen seiner Weichheit, Geschmeidigkeit und Leichtschmelzbarkeit ein sehr brauchbares Metall, namentlich auch, weil es unter den widerstandsfähigen Metallen das billigste ist. Seine Verbreitung als Metallerz wird nur noch von den Erzen des Eisens übertroffen. Blei schmilzt schon bei 325°, und sein spezifisches Gewicht ist 11,25. Die löslichen Bleiverbindungen sind für den menschlichen Körper meist sehr giftig; seine Salze haben dabei oft einen nicht unangenehmen süßen Geschmack. Man nennt sie schleichende Gifte, weil ihre Wirkung oft erst lange Zeit nach der Einführung hervortritt. Blei wird zur Herstellung von Farben sowie einer besonderen Glassorte und zur Glasur von Töpferwaren verwendet. Bleiweiß, kohlensaures Blei, haben wir schon angeführt. Die Mennige, die ziegelrote Farbe, mit der man Eisenteile zu überziehen pflegt, um sie gegen Rost zu schützen, ist nach der Formel Pb_3O_4 zusammengesetzt; die rötlichgelbe Bleiglätte, PbO, dient als Zusatz für das Bleiglas.

Quecksilber nennt man ein halbedles Metall, da es an der Luft beständig bleibt und nur von den stärkeren Säuren angegriffen wird. Dagegen oxydiert es sich in der Hitze leicht. Wegen seiner Flüssigkeit und zugleich großen Schwere findet es in der Physik vielfache Anwendung, wovon wir oft zu sprechen hatten. Von seinem Schmelzpunkt bei —39,5°, seinem Siedepunkt bei 357° und seiner Dichte, die 13,6 bei 0° ist, ist ebenfalls wiederholt die Rede gewesen. Auch haben wir erwähnt, daß es in der Natur als der bekannte Farbstoff Zinnober, HgS, aber selten gediegen vorkommt. Unter seinen Verbindungen mag das Quecksilberchlorid, Sublimat, $HgCl_2$, genannt sein, das zwar außerordentlich giftig wie das Quecksilber überhaupt ist, aber als Antiseptikum Verwendung findet und vom Photographen beim sogenannten Verstärkungsprozeß gebraucht wird. Ferner ist das sogenannte Knallquecksilber zu erwähnen, $HgC_2N_2O_2$, das schon bei gelindem Druck explodiert und aus diesem Grund für Zündhütchen Verwendung findet.

Das Silber ist dem Quecksilber chemisch sehr ähnlich. Es ist das erste wirklich edle Metall, dem wir begegnen, da es in der Luft beständig ist, nur von den stärkeren Säuren angegriffen wird und schwer, bei 954°, schmilzt. Es ist mit dem spezifischen Gewicht 10,5 leichter als Quecksilber, seine sonstigen äußeren Eigenschaften sind bekannt. Wir haben schon erwähnt, daß es gediegen, aber hauptsächlich als Erz in einer Schwefelverbindung vorkommt, die, wie das Zink, meist daneben nicht unbedeutende Mengen Arsenik mitführt. Es gibt ein Knallsilber, wie wir ein Knallquecksilber kennen lernten, doch ist jenes noch weit gefährlicher. Unter den Verbindungen hat uns schon das salpetersaure Silber, Höllenstein, $AgNO_3$, und namentlich das Chlor-, Jod- und Bromsilber interessiert, diese drei wegen ihrer lichtempfindlichen Eigenschaften.

Kupfer ist noch schwerer schmelzbar als Silber (bei 1054°), aber etwas leichter als dieses Metall ($d = 8{,}9$) und verhält sich an der Luft und in den Säuren ganz ähnlich wie jenes. Es müßte deshalb gleichfalls zu den edlen Metallen gezählt werden, wenn es so selten wäre wie das

Silber. Wir kennen seine allgemeinen Eigenschaften und haben es, namentlich bei den elektrogalvanischen Versuchen, verwendet.

Wismut hat ein rötlichweißes Aussehen, erinnert also einerseits an Kupfer, anderseits an Silber. Es bildet chemisch einen Übergang zu der nächsten Gruppe der schwersten und beständigsten Metalle. Sein chemisches Verhalten ist dem des Silbers und Kupfers ähnlich, aber es schmilzt schon bei der sehr niedrigen Temperatur von 268°. Seine Dichtigkeit ist sehr groß, sie beträgt 9,82, liegt also zwischen der des Silbers und Kupfers. Auch das Wismut hat uns bei der Betrachtung der elektromagnetischen Phänomene (Diamagnetismus) bereits mehrfach interessiert.

Das erste Glied der Gruppe der schwersten und beständigsten Metalle, nach dem sie den Namen trägt, ist das Zinn. Es ist noch leichter schmelzbar als Wismut (bei 233°) und zugleich verhältnismäßig leicht (d = 7,3), also etwa wie Eisen. Seine Verwandtschaft zum Sauerstoff ist dagegen wesentlich geringer als bei den Metallen der Eisen- und Bleigruppe. Die hier angeführten Metalle der Bleigruppe verbinden sich weder mit Schwefel- noch mit Salzsäure, wohl aber mit Salpetersäure. Zinn löst sich noch schwach in warmer Salzsäure, wie überhaupt die erwärmten Säuren immer kräftiger wirken als die kalten; in Salpetersäure dagegen verwandelt sich Zinn in eine breiartige Masse. Es ist schön weißglänzend wie Silber, aber brüchig und knirscht eigentümlich beim Zerbrechen, was von seiner kristallinischen Struktur herrührt. Wegen dieser Sprödigkeit ist das Zinn, außer in den bekannten dünnen Stanniolblättchen, allein wenig zu verwenden; dagegen dient es wegen seiner leichten Schmelzbarkeit zum Überziehen, Verzinnen, leicht an der Luft oxydierbarer Metalle, z. B. von Eisenblech, das man in dieser Verarbeitung Weißblech nennt, das heute sehr vielseitige Verwendung findet. Zinnsulfid, SnS_2, ist eine goldähnliche Masse, die zum Bronzieren gebraucht wird.

Gold ist das edelste von allen Metallen, weil es alle ihre Eigenschaften im vollkommensten Maße besitzt. Denn es ist ganz beständig an der Luft und in allen Säuren unlöslich, mit Ausnahme des als Königswasser bekannten Gemisches von Salpeter- und Salzsäure. Es schmilzt erst bei 1045°, ist sehr schwer (d = 19,3), dagegen außerordentlich dehnbar, also zu vielartiger Verarbeitung fähig. Man kann Gold so dünn ausziehen, daß ein 3 m langer Draht nur 1 mg wiegt, und auch zu Blattgold wird es sehr dünn gewalzt. Meist kommt das Gold gediegen vor und wird wegen seiner Schwere durch Auswaschen von dem leichteren Erdreich getrennt. Nur auf Umwegen geht es wenige Verbindungen ein, aus denen es durch Erhitzen leicht wieder getrennt werden kann. Von den Verbindungen des Goldes haben wir das Goldchlorid, $AuCl_3$, bereits erwähnt. Es gibt auch ein Knallgold, das ähnlich zusammengesetzt ist wie Knallsilber und Knallquecksilber und, da es leichter wie jene die gebundenen Gase abgibt, noch leichter explodiert.

Platin hat die Eigenschaften eines edlen Metalles noch in höherem Maße als das Gold, aber nicht seine schöne Farbe; denn es ist grauweiß und matt glänzend, auch ist es nicht so dehnbar. Sein Schmelzpunkt liegt bei 1775°, es ist also noch wesentlich feuerbeständiger als Gold, und auch sein Gewicht ist größer (d = 21,45). Keine Säure, selbst die das Glas zerstörende Flußsäure, greift es an, so daß wir in ihm, neben seinen Begleitmetallen und dem Kohlenstoff, überhaupt den beständigsten unter allen bekannten Stoffen sehen. Zugleich ist Platin fast ebenso selten wie Gold und stellt sich im Preis auf etwa zwei Drittel von dem des Goldes. Seine Verbindungen müssen auf Umwegen hergestellt werden. Nur das Platinchlorid, $PtCl_4$, entsteht direkt durch Auflösung in erhitztem Königswasser, und von ihm aus werden dann die anderen

Verbindungen möglich. Aus einer derselben kann man ein Salz niederschlagen, das, erhitzt, das Platin in äußerst fein verteiltem Zustand als sogenannten Platinschwamm zurückläßt, dessen in der Porosität liegende starke Wirkung wir bereits besprochen haben (S. 129). Er ist im stande, durch seine bloße Gegenwart chemische Verbindungen zu veranlassen, die ohne weiteres nicht stattfinden würden; ein Beweis dafür, daß den relativen Entfernungen der Moleküle voneinander eine sehr wichtige Rolle bei dem Spiel der chemischen Affinitäten zugeteilt ist. Von einer anderen Platinverbindung, dem Bariumplatincyanür, haben wir bereits sehr wichtige Anwendungen gemacht wegen seiner Fähigkeit, kurzwelliges Licht in solches von geringerer Brechbarkeit umzuwandeln und dadurch ultraviolette Strahlen sichtbar zu machen. Auch seine Verwendung für das Sichtbarmachen von Röntgenbildern ist uns bekannt.

Das Platin wird, wie wir wiederholt erwähnten, von fünf ihm ähnlichen Metallen begleitet, die für uns mehrfaches Interesse haben, so daß wir hier trotz ihrer Seltenheit einige Worte von ihnen sagen wollen.

Das leichteste unter diesen Metallen ist das Palladium, dessen spezifisches Gewicht nur 11,8 beträgt; Palladium ist also noch einmal so leicht wie das Platin, auch sein Atomgewicht ist wesentlich geringer (106 gegen 194). Von Säuren wird es etwas leichter angegriffen; z. B. löst es sich schon in Salpetersäure. Sonst ist es auch im Äußeren dem Platin sehr ähnlich. Da es geschmeidig ist, läßt es sich verarbeiten, so daß man es in neuerer Zeit vielfach zu Uhrfedern statt des Goldes verwendet. Es hat den Vorteil, bei einem noch etwas geringeren Ausdehnungskoeffizienten leichter zu sein als Gold, und man hat auch beobachtet, daß es auf Temperaturänderungen mit noch größerer Gleichmäßigkeit reagiert als jenes Metall.

Rhodium ist fast ebenso schwer wie Palladium ($d = 12{,}1$), auch in seinem Atomgewicht ihm ähnlich: 103. Es ist dagegen fast noch widerstandsfähiger gegen Hitze und Säuren als das Platin selbst, weicht also in dieser Hinsicht vom Palladium sehr wesentlich ab.

Ihm wieder sehr nahe steht das Ruthenium ($d = 12{,}3$, Atomgewicht 101,7). Von Königswasser wird es kaum angegriffen und läßt sich nur in den äußersten Hitzegraden schmelzen. Ruthenium und Rhodium erscheinen als Pulver, das erstere grauweiß, das letztere grau, lassen sich also nicht zu metallischen Körpern zusammenschmelzen.

Bilden die drei Elemente Palladium, Rhodium und Ruthenium eine besondere Untergruppe, so ist das Gleiche der Fall mit Platin, Osmium und Iridium.

Osmium und Iridium haben fast die gleiche Dichtigkeit und auch das gleiche Atomgewicht wie Platin. Für Osmium ist $d = 22{,}5$ und das Atomgewicht 191, für Iridium sind diese Werte 22,4 und 193.

Osmium ist ein unschmelzbares schwarzes Pulver. Auf Umwegen läßt sich eine Osmiumsäure, OsO_4, herstellen, die gasförmig wird und den merkwürdigen Fall darstellt, daß der dichteste von allen überhaupt bekannten Stoffen in Verbindung mit dem Sauerstoff ein flüchtiges Gas bilden kann.

Iridium ist indes nur um ein kleines weniger dicht und wie das Osmium noch weniger schmelzbar als Platin (bei 1900°), dabei selbst in Königswasser unlöslich, welchem das Platin nachgibt. Osmium und Iridium haben die kleinsten Ausdehnungskoeffizienten von allen Metallen, 0,00000657, beziehungsweise 0,00000683; diese verhalten sich aber gegen den des Stahles immer noch wie etwa 11 zu 7. Unter allen Stoffen überhaupt haben nur noch Diamant und Kiesel geringere Ausdehnungsfähigkeit. Bedenkt man, daß der Diamant verhältnismäßig leicht verbrennt und der Kiesel eine Menge von Verbindungen eingeht, so haben wir in jenen beiden

Elementen Osmium und Iridium überhaupt die widerstandsfähigsten Stoffe unserer Kenntnis vor uns, mit denen wir die Aufzählung der einfachen Stoffe beenden.

i) Die Metalllegierungen.

Schon bei den Betrachtungen über die Festlegung eines Einheitsmaßes, S. 190, haben wir von einer Mischung von Platin mit Iridium gesprochen, die zwar einen etwas größeren Ausdehnungskoeffizienten als reines Iridium — man pflegt bei dieser Mischung nur 8 Prozent Iridium zu verwenden — hat, dagegen die kleinste Veränderung des Koeffizienten bei veränderter Temperatur selbst zeigt und deshalb die sicherste Berechnung dieses Einflusses gestattet. Solche Vermischungen zweier Metalle nennt man Legierungen oder beim Quecksilber Amalgame. Sie sind durchaus nicht bloße physikalische, sondern müssen zugleich als chemische Verbindungen angesprochen werden oder doch jedenfalls ähnlich wie die Lösungen der Salze, von deren Eigenschaften wir noch eingehender zu sprechen haben, eine besondere Stellung zwischen den eigentlichen chemischen Verbindungen und den bloßen Mischungen einnehmen. Die Legierungen zeigen oft sehr wesentlich verschiedene Eigenschaften von denen ihrer Komponenten, die nicht ohne weiteres wieder voneinander zu trennen sind, wenn es auch leichter geschieht als bei anderen Verbindungen, weil ja die Affinität zwischen den einander so ähnlichen Metallen keine große ist. Dennoch nimmt man bei dem Zusammenschmelzen der Metalle oft eine ziemlich bedeutende Wärmeentwickelung wahr, und die entstehenden Legierungen sind dann härter und dichter als der dichteste der beiden Bestandteile, was auf eine starke chemische Anziehung hindeutet. Der Schmelzpunkt der Legierungen liegt dagegen fast immer tiefer als der des am leichtesten schmelzenden Bestandteiles. Teils in der größeren Härte, teils in der der leichteren Schmelzbarkeit besteht der praktische Vorteil der Legierungen, von denen wir hier einige der bekanntesten anführen.

Chrom verbindet sich mit Stahl im elektrischen Ofen zu einer ungemein harten Legierung. Ebenso ist Nickelstahl fast noch einmal so hart wie gewöhnlicher Stahl.

Die Nickelmünzen werden aus einer Legierung von $^{1}/_{4}$ Nickel und $^{3}/_{4}$ Kupfer hergestellt. $^{1}/_{4}$ Nickel + $^{1}/_{4}$ Zink + $^{1}/_{2}$ Kupfer gibt das Neusilber.

Messing ist eine Legierung von Zink und Kupfer. Je nachdem man von dem einen oder dem anderen mehr nimmt, kann man Gelbguß, Talmigold oder Tombak erhalten.

Kupfer und Zinn geben die Bronze, die wieder je nach der Mischung zum Kanonenguß oder zum Glockenguß verwendet wird.

Sowohl die Silber- als die Goldmünzen sind Kupferlegierungen. Gold wird überhaupt nicht rein zu irgendwelchen praktischen Zwecken verwendet, denn es ist sehr weich und würde sich, als Münze oder Schmuckgegenstand verarbeitet, zu schnell abnutzen. Seine Legierungen sind dagegen wesentlich härter. Das Feingewicht des Goldes wird in Teilen vom Tausend angegeben.

1 Teil Blei + 2 Teile Zinn bilden das sogenannte Schnellot, das sehr leicht schmelzbar ist (196°) und deshalb zur festen Verbindung, zum Verlöten zweier Metallstücke gut zu verwenden ist.

Aus Zinn und Eisen erhält man eine Legierung, die als Grundlage für die Verarbeitung des Eisens zu Weißblech dient.

Blei und Antimon geben das Hartblei für die Drucklettern.

Aus Kadmium und Wismut besteht das sogenannte Newtonsche Metall, das schon bei 95° schmilzt, während der Schmelzpunkt der Einzelmetalle bei 320°, beziehungsweise 268°

liegt. Noch niedriger liegt der Schmelzpunkt der sogenannten **Lipowitzschen Legierung**, die sich aus Kadium, Wismut, Blei und Zinn zusammensetzt. Alle diese sind sehr leicht schmelzbare Metalle, die aber doch nicht unter 200° flüssig werden; ihre Legierung dagegen schmilzt bereits bei 60°, also schon in heißem Wasser, und kann deshalb zu mancherlei interessanten physikalischen Experimenten verwendet werden.

Die **Quecksilberlegierungen** oder **Amalgame** sind zwar insofern den anderen Legierungen ähnlich, als sie an Härte gewinnen, indem das Quecksilber in Verbindung mit dem anderen Metall meist fest wird; aber der Schmelzpunkt der Amalgame bleibt über dem des flüssigen Metalles. Quecksilber bildet Amalgame mit fast allen Metallen, die zu sehr verschiedenen Zwecken benutzt werden. Manche dieser Verbindungen entstehen unter Abkühlung, andere unter starker Erhitzung, so das **Kalium-** und **Natriumamalgam**. Die Eigenschaft des Quecksilbers, Gold- und Silberkörnchen aus beliebigen Gemengen aufzunehmen, gibt ihm für die Edelmetallgewinnung aus Pocherzen große Bedeutung. Aus dem Amalgam wird nachher das Quecksilber durch Verdampfung wieder entfernt. Ein Quecksilber-Zinn-Amalgam wurde zur **Belegung von Spiegeln** benutzt, ist aber heute fast ganz vom Silberbeleg verdrängt worden. Andere Amalgame dienen zur Feuervergoldung und -Versilberung, indem man aus dem aufgetragenen Amalgam das Quecksilber durch Hitze wieder vertreibt.

k) Rückblick.

Wir haben uns bisher nur in ganz summarischer Weise mit den Grundstoffen und ihren chemischen Eigenschaften bekannt gemacht, deren Zusammenwirken die Welt aufgebaut hat, und dabei eine Fülle von Tatsachen aufgeführt, in welchen es auf den ersten Blick schwer fällt, Gesetz und Ordnung zu entdecken. Die achtundsiebzig Elemente, denen wir begegneten, zeigen die verschiedensten Eigenschaften. Es gibt gasförmige, flüssige und feste Elemente; doch lassen sich die meisten in alle drei Aggregatzustände bringen, und von den anderen muß man vermuten, daß eine genügend vorgeschrittene Experimentierkunst auch sie durch alle drei Zustände führen wird. Aber diese Überführung geschieht unter den verschiedensten Umständen. Es gibt Stoffe, die nur unter sehr schwer herzustellenden Temperaturen ihren Aggregatzustand ändern, und bei denen der Schmelz- vom Siedepunkt weit entfernt liegt; andere wieder gehen, wie das Arsen, vom festen gleich in den gasförmigen Zustand über. Eine ganze Reihe von Stoffen kann unter gleichen physikalischen Umständen verschiedene Eigenschaften annehmen in ihren sogenannten **allotropen Zuständen**; derartige Stoffe sind der Sauerstoff, der Kohlenstoff, der Schwefel und der Phosphor. Während man sonst nur Veränderungen der Eigenschaften wahrnahm, wenn verschiedene Stoffe miteinander in Verbindung traten, so sehen wir, daß bei diesen allotropen Veränderungen **Stoffe sich mit sich selbst verbinden** und dadurch scheinbar zu neuen Stoffen werden.

Es ist dies, wie schon erwähnt wurde, eine Folge verschiedener Atomgruppierungen. An diesen Gruppierungen der Atome verschiedener Elemente lernten wir gewisse Gesetzmäßigkeiten kennen, wie ihre Wertigkeit und ihr Zusammentreten in ganz bestimmten Gewichtsmengen, die durch sogenannte „Atomgewichte" ausgedrückt werden. Aber auch hier treten so viele verschiedene Fälle auf, daß sie zunächst verwirrend wirken. Im allgemeinen richtet sich die natürliche Schwere, d. h. die Dichtigkeit der Stoffe, nach ihren Atomgewichten; aber der Zusammenhang ist durchaus nicht ganz gesetzmäßig und zeigt sehr auffällige Ausnahmen. Die verschiedenen Verwandtschaften der Stoffe zueinander müssen ja zweifellos in gegenseitig

abgestuften Anziehungen der Atome in ihren molekularen Gruppen ihren Grund haben; die Atomgewichte werden also bei den Affinitäten eine wichtige Rolle spielen, aber auch hier ist zunächst nicht die vermutete Gesetzmäßigkeit zu erkennen. Die Atome von Sauerstoff und Stickstoff haben nahezu gleiches Gewicht. Während sich aber jener leicht mit fast allen Stoffen verbindet, ist der Stickstoff, gleichfalls ein Gas, ein durchaus träger Körper, der sich nur unter besonderen Umständen mit wenigen anderen Körpern vereint. Die sehr schweren Platinmetalle sind ebenso träge wie der flüchtige, leichte Stickstoff. Wasserstoff ist in vielen Fällen wirksamer als Sauerstoff, er vertreibt ihn oft, obgleich sein Atom sechzehnmal leichter ist. Überhaupt scheinen gerade die leichteren Stoffe die wirksameren zu sein.

Auch sonst nehmen wir eine Fülle von seltsamsten Eigenschaften an den chemischen Verbindungen wahr. Kohlenstoff ist unschmelzbar, aber, mit Sauerstoff zusammengebracht, verwandelt er sich schon bei verhältnismäßig wenig erhöhter Temperatur in ein Gas und geht nun, einmal an einen anderen Stoff gebunden, die verschiedenartigsten Verbindungen auf das leichteste ein, während er als Element absolut träge war. Das härteste aller Metalle wird nach seiner Vereinigung mit Sauerstoff zu einem flüchtigen Gas. Ein außerordentlich giftiges Gas, wie das Chlor, verbindet sich mit einem Metall, dem Natrium, zu dem heilsamen Kochsalz; die Bestandteile der Luft können sich dagegen zu einer heftigen, alles zerstörenden Säure vereinigen, und noch viele andere merkwürdige Erscheinungen wären aufzuzählen. In all dieser Mannigfaltigkeit verschiedenartigster Wirkungen, die man oft an ein und demselben Stoffe beobachtet, sieht man überall Gesetzmäßigkeiten gewissermaßen durchschimmern und erkennt einen gewissen, noch durch irgendwelche Nebenumstände verschleierten Zusammenhang mit den physikalischen Eigenschaften der Stoffe. Erst in den letzten Jahrzehnten sind viele dieser Beziehungen aufgedeckt worden, welche wir in späteren Kapiteln systematisch zu behandeln gedenken, nachdem wir uns vorher noch über die organischen oder Kohlenstoffverbindungen einen Überblick verschafft haben.

3. Die organischen oder Kohlenstoffverbindungen.

Als wir im vorangehenden einen flüchtigen Überblick der Verbindungen gaben, welche die uns bekannten chemischen Elemente miteinander eingehen, haben wir dabei nur jene wenigen Kohlenstoffverbindungen erwähnt, die auch in der unorganischen Natur vorkommen. Wie aber ein Baum mit seinem einfachen Stamme sich über das Erdreich erhebt und sich verzweigt in tausendfachen Verästelungen, so heben sich die **Kohlenstoffverbindungen** aus allen anderen Stoffgebilden mit einer solchen Fülle von Mannigfaltigkeiten hervor, daß nichts im ganzen übrigen Gebiete der Chemie auch nur annähernd damit zu vergleichen ist. Alle die tausendfältigen Kombinationen, die in der Natur uns unter den verschiedensten Eigenschaften entgegentreten, sei es als Gase, Öle, Fette, Alkohole, Säuren, als Fruchtsäfte, als Zucker, Stärke, als Farbstoffe, Essenzen, die den Duft der Blumen erzeugen, als tückische Gifte oder heilkräftige Säfte, sind in den allermeisten Fällen nur aus drei Elementen, Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, aufgebaut, bestehen also nur aus Kohle und Wasser. Nur in verhältnismäßig geringen Mengen, hauptsächlich bei den Produkten des Tierreiches, treten noch einige Stickstoffatome in jene Verbindungen ein; auch Phosphor, Schwefel, Eisen u. s. w. findet man vertreten, aber immer nur in sehr geringem Prozentsatz gegenüber jenen „**Organogenen**“, wie man die vier Elemente C, H, O, N nennt. In keinem anderen Gebiete der Naturentfaltung tritt uns die Überzeugung, daß sich die ganze Fülle der Erscheinungen, die uns umgibt, aus so

wenigen Grundeigenschaften einheitlich aufbaut, deutlicher entgegen. Kohle, Wasser und der uns überall umgebende Stickstoff haben ohne weiteres fast keine anderen Fähigkeiten als die der Raumausfüllung, die wir als die erste und notwendig vorhandene Eigenschaft der Materie ansahen. Ihre gegenseitigen Gruppierungen schaffen dennoch alle die Wunder und die Schönheit der organischen Natur. Hier zeigt es sich am augenfälligsten, daß es nur die Gruppierung ist, welche die Eigenschaften, wie sie uns in die Erscheinung treten, bedingen. Aus diesem Gesichtspunkte gewinnt die Verfolgung des vielverzweigten Aufbaues der organischen Verbindungen aus jenen einfachen Mitteln in ihren wunderbar harmonischen Verkettungen tiefe Bedeutung und einen ganz besonderen Reiz, der dem anorganischen Teile der Chemie fehlt.

Die organischen Verbindungen pflegt man in zwei Hauptgruppen zu trennen, die der Fettkörper und der aromatischen Körper, versteht aber chemisch unter der ersten Gruppenbezeichnung nicht nur die Körper, die man im gewöhnlichen Leben fett nennt. Deshalb kann eine Trennung der beiden Gruppen von vornherein, ehe wir die Systematik in den hier hervortretenden Atomgruppierungen kennen, nicht gegeben werden; es stellt sich überhaupt heraus, daß jene Unterscheidung eine recht willkürliche ist, die wir nur aus alter Gewohnheit noch beibehalten. Allerdings gibt die neuere Chemie eine einfache und scheinbar ganz klare Unterscheidung dadurch, daß sie hervorhebt, daß die chemisch sogenannten Fettkörper aus Molekülen bestehen, in denen die Atome kettenförmig angeordnet sind, während diese bei den aromatischen Körpern Ringe bilden. Wir werden dies nach den folgenden Abschnitten besser verstehen.

A. Die Fettkörper oder Methanderivate.

a) Kohlenwasserstoffe.

Der Vater aller dieser Verbindungen ist das sogenannte Sumpfgas, das Kohlenwasserstoffgas, CH_4, dessen wissenschaftlicher Name Methan ist. Die Strukturformel dieses Stoffes ist:

```
   H
   |
H–C–H
   |
   H
```

Im folgenden werden wir immer die Strukturformeln angeben, um den schließlich sehr verwickelt werdenden Bau der Moleküle aus ihren einfachen Elementen, jenen wunderbaren Kristallisationsprozeß innerhalb einer für uns ewig unsichtbar bleibenden Welt verfolgen zu können.



Gewinnung von Sumpfgas.

Das Sumpfgas hat seinen Namen daher, daß es bei der Zersetzung pflanzlicher oder tierischer Stoffe entsteht, die man in Sümpfen antrifft, aus denen es in Blasen aus dem Grundschlamm aufsteigt. Man kann es etwa so, wie es die nebenstehende Abbildung darstellt, aus der Natur direkt gewinnen. Da wir bereits wissen, daß alle organischen Substanzen zum größten Teil aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen, so begreifen wir, daß diese einfachste Atomverbindung bei dieser Zersetzung noch übrigbleiben kann. Methan ist ein farb- und geruchloses Gas, das erst bei —164° flüssig wird, mit nichtleuchtender Flamme verbrennt und, mit Luft gemischt, wie Knallgas explodiert. Es ist dasselbe Gas, welches in Kohlenbergwerken die schlagenden Wetter verursacht. Bei der Verbrennung vereinigt sich ein Sauerstoffmolekül O_2 aus der Luft mit dem Kohlenstoffatom des Methans zu Kohlensäure, CO_2, während sich je zwei Wasserstoffatome mit einem

Sauerstoffatom zu Wasser verbinden: $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$. So sehen wir jenes Zersetzungsprodukt aller jener verwickelten Verbindungen, die wir noch kennen lernen werden, in den Bereich der toten Natur wieder zurückkehren; wir hatten ja die Kohlensäure, die in vielen Gesteinen enthalten ist, zu den anorganischen Verbindungen rechnen müssen.

Allein aus diesen beiden Elementen, Kohlenstoff und Wasserstoff, aus denen das Methan besteht, hat es nun die Natur verstanden, große Reihen von Stoffen zu bilden, die sehr verschiedene Eigenschaften haben; es sind dies die Kohlenwasserstoffe. Sie hat dies auf die folgende Weise ermöglicht: das Methan selbst ist eine gesättigte Verbindung, deren Moleküle durch die Aneinanderreihung demnach keinen neuen Stoff bilden, sondern es vermehrt sich nur die Menge desselben Stoffes. Die Natur half sich deshalb dadurch, daß sie aus C und H gewissermaßen zwei neue Pseudoelemente schuf, wie wir sie im Ammonium und im Cyan bereits kennen lernten.

Das in diesem Falle zusammengesetzte Atom des ersten Pseudoelements hat die Formel CH_3, also im Bau $\begin{smallmatrix}H\\H\\H\end{smallmatrix}{>}C-$; dieser einwertige Stoff heißt Methyl. In der Natur kann es, wie die meisten übrigen Stoffe, nur als gesättigtes Molekül vorkommen, das demnach aus zwei solchen Atomen bestehen muß. Aus diesen zwei Atomen entsteht die Verbindung C_2H_6, Äthan genannt, dessen Strukturformel $\begin{smallmatrix}H\\H\\H\end{smallmatrix}{>}C-C{<}\begin{smallmatrix}H\\H\\H\end{smallmatrix}$ lautet. Es ist gleichfalls ein Gas, das aber noch einmal so dicht ist wie das Methan, sich viel leichter verflüssigen läßt und mit leuchtender Flamme brennt.

Das andere Pseudoelement hat die Formel CH_2, im Aufbau $\begin{smallmatrix}H\\H\end{smallmatrix}{=}C{=}$, ist also zweiwertig und wird Methylen genannt. Das zweiatomige Molekül dieses Pseudoelements ist analog dem vorher genannten Äthan gebildet, hat also die Formel C_2H_4. Dieser Stoff, Äthylen, ist auch gasförmig, aber nicht ganz so dicht wie Äthan, brennt mit leuchtender Flamme und siedet bei -103°.

Als drittes Pseudoelement erhalten wir CH, oder im Aufbau $H-C{\equiv}$, also ein dreiwertiges Atom, das im Molekül zu $H-C{\equiv}C-H$ oder C_2H_2 wird. Es ist abermals ein Gas, das Acetylen, das in neuerer Zeit als Leuchtgas recht bekannt geworden ist. Wir haben schon bei den anorganischen Verbindungen (S. 439) erwähnt, wie es aus Calciumkarbid vom Wasser ausgeschieden wird.

Mit diesen drei Pseudoelementen baut die Natur eine ganze Anzahl von Reihen verschiedener Stoffe auf, die man als Methan-, Äthylen-, Acetylenreihen rc. bezeichnet.

Das erste Glied der Methanreihe ist das Äthan, C_2H_6, das wir soeben kennen gelernt haben. Der nächste Stoff der Reihe entsteht durch Hinzufügung einer CH_2-Gruppe zu den beiden Atomen CH_3 des Äthanmoleküls; die Strukturformel ist also $\begin{smallmatrix}H\\H\\H\end{smallmatrix}{>}C-\overset{H}{\underset{H}{C}}-C{<}\begin{smallmatrix}H\\H\\H\end{smallmatrix}$, oder C_3H_8. Der Stoff heißt Propan und ist gleichfalls ein brennbares Gas. Schiebt sich abermals eine CH_2-Gruppe ein, entsteht das Butan, C_4H_{10}, mit der Strukturformel $\begin{smallmatrix}H\\H\\H\end{smallmatrix}{>}C-\overset{H}{\underset{H}{C}}-\overset{H}{\underset{H}{C}}-C{<}\begin{smallmatrix}H\\H\\H\end{smallmatrix}$, oder einfacher geschrieben $(CH_3)-(CH_2)_2-(CH_3)$.

Auch das Gas Butan ist noch brennbar, aber es siedet bereits bei Temperaturen in der Nähe des Nullpunktes. Genau in derselben Weise geht es nun in dieser Reihe weiter, indem sich immer eine CH_2-Gruppe in der Mitte einfügt, während an beiden Seiten als Abschluß der Kette je eine CH_3-Gruppe stehen bleibt. Wir können, wenn wir nur die Zahl der C- und

H-Atome angeben wollen, für alle Körper dieser Gruppe die allgemeine Formel C_nH_{2n+2} aufstellen, in der n in ganzen Zahlen fortschreitet.

Alle diese Verbindungen sind völlig gesättigt. Sie heißen nacheinander Pentan, Hexan, Heptan zc., je nach der Anzahl der in ihnen enthaltenen Kohlenstoffatome. Allein durch diese eine Form von Verbindungen vermag also die Natur eine unendliche Zahl verschiedener Stoffe zu bilden, und sie geht, soviel wir ermitteln konnten, darin ziemlich weit. In diese Reihe gehört z. B. das bekannte Paraffin, weshalb man sie auch die Paraffinreihe nennt. Es besteht aus einem Gemisch von sehr verschiedenen reinen Kohlenwasserstoffen, ist aber erst mit $C_{20}H_{42}$ einzusetzen. Je mehr CH_2-Gruppen zu den Verbindungen dieser Reihe treten, desto schwerer sieden sie, das Paraffin z. B. erst bei 360—370°; es ist also unter normaler Temperatur ein fester Körper, der, wie bekannt, zu Kerzen verwendet wird, weil er sich erst bei der genannten Temperaturgrenze zu einem Gase verflüchtigt und alsdann zur Beleuchtung dient. Das Paraffin wird aus Braunkohlen und Torf gewonnen und hat seinen Namen wegen seiner geringen Verwandtschaft zu den meisten Stoffen, gegen die es sich indifferent verhält, während es mit Sauerstoff, wie alle übrigen Kohlenwasserstoffe, zu Kohlensäure und Wasser verbrennt.

Wir müssen hier eine wichtige Betrachtung einschieben, ehe wir zu den anderen Reihen der Kohlenwasserstoffe übergehen. Zwei Methylengruppen $-(CH_2)-(CH_2)-$ bestehen aus C_2H_4; ebenso ist aber auch $=(CH)-(CH_3) = C_2H_4$. Diese Vereinigung ist geradeso zweiwertig wie die obige und hat genau soviel Kohlenstoff- und Wasserstoffatome wie jene. Man kann sie also in der Formel für das Butan an die Stelle der beiden CH_2 setzen und erhält so zwei verschiedene Formeln, nämlich erstens die oben schon gegebene $(CH_3)-(CH_2)_2-(CH_3)$ und zweitens $(CH)\equiv(CH_3)_3$. Es muß demnach zwei Butane geben, die zwar eine völlig gleiche prozentuale Zusammensetzung von Kohlenstoff und Wasserstoff haben, aber doch voneinander verschieden sind, wenn es richtig ist, daß die bloße Anordnung der Atome im Molekül bereits verschiedene Eigenschaften bedingt. Dies bestätigt sich in der Tat. Die beiden existierenden Butane haben verschiedene Dichtigkeit und sieden bei verschiedenen Temperaturen, das eine, der ersten Formel entsprechende, bei +1°, das zweite bei —17°. Es kann unter diesen Voraussetzungen auch nicht mehr als diese beiden Butane geben, was wieder zutrifft. Wir nennen diese gleichzeitigen Zustände Isomerien und begreifen, wie wichtig diese Wahrnehmung für unsere Ansichten über die Beziehungen der Materie innerhalb der Welt der Atome ist.

Nach dem Vorangehenden können wir sofort auf dem Papier nachweisen, wieviel solcher isomerer Zustände eine bestimmte organische Verbindung haben kann. Für einzelne dieser Formeln, z. B. C_6H_{14}, lassen sich fünf verschiedene Konstruktionen finden, und es kommen tatsächlich fünf verschiedene Stoffe mit denselben Formeln in der Natur vor, die sich in verschiedenen Eigenschaften, besonders den Siedepunkten, unterscheiden. Für C_8H_{18} sind sogar 18 Isomerien möglich, aber nicht alle bekannt.

Obgleich wir später im Zusammenhange mit allen betreffenden Erscheinungen von den Beziehungen zwischen den physikalischen und den chemischen Erscheinungen zu sprechen haben, mag doch schon bei dieser Gelegenheit darauf hingewiesen werden, daß der Siedepunkt um so niedriger wird, je mehr Glieder in den Verbindungen von einem einzelnen Gliede durch seine Valenzen festgehalten werden müssen.

Wir gehen zur Äthylenreihe über und geben zunächst die Strukturformel des Äthylens selbst noch einmal in etwas vereinfachter Weise wieder: $(CH_2)=(CH_2)$ oder C_2H_4. Diesen Stoff können wir als aus der Mitte eines Äthans herausgerissen betrachten, in dem er unter

der Form $-(CH_2)-(CH_2)-$ also mit zwei offenen Valenzen auftritt; wir haben z. B. das normale Butan $(CH_3)-(CH_2)-(CH_2)-(CH_3)$ geschrieben. Letzteres wäre auch Äthanäthylen zu nennen und muß aus der Verbindung des Äthans und des Äthylens entstehen. Diese sogenannten ungesättigten Verbindungen können die zweite Valenz leicht nach außen wenden $-(CH_2)-(CH_2)-$, um damit andere, mit ihnen in Berührung gebrachte einwertige Stoffe zu binden. In noch höherem Maß ist dies mit Körpern der Fall, die sich sogar mit drei Valenzen binden müssen, wie $(CH)\equiv(CH)$, woraus sich ihre Unbeständigkeit erklärt, von der wir schon weiter oben sprachen. Das Äthylen oder ölbildende Gas ist also nur wenig beständig und verbindet sich darum leicht mit anderen Stoffen. Die höheren Glieder seiner Reihe entstehen wieder durch sukzessive Addition von je einer CH_2-Gruppe. Das nächste Glied ist Propylen, C_3H_6, das folgende Butylen, C_4H_8, ferner Amylen, Hexylen u. s. w. Die **allgemeine Formel** ist C_nH_{2n}. Zu den höheren Gliedern dieser Reihe gehört das **Ceroten**, $C_{27}H_{54}$, welches im Wachs enthalten ist.



Petroleumquellen in Baku. Vgl. Text, S. 473.

Die **nächste Reihe** ist die des **Acetylens**. Die Formel ihres ersten Gliedes selbst ist C_2H_2 oder $(CH)\equiv(CH)$. Hier binden sich also bereits drei Valenzen gegenseitig; demnach muß dieser Stoff sehr leicht andere Verbindungen eingehen, so daß Acetylen unter Umständen gefährlich werden kann. Wir kennen es als ein Gas, das sehr hell brennt, weil es gegenüber anderen Brenngasen einen großen Kohlenstoffgehalt besitzt, der, wie wir wissen, die Leuchtkraft unter der Voraussetzung bedingt, daß seine vollständige Verbrennung nach dem Erglühen in der Flamme erfolgen kann. Die **allgemeine Formel dieser Reihe** ist C_nH_{2n+2}. Als zweites Glied (Homologe) haben wir das **Allylen**. Für dieses ist in der allgemeinen Formel $n = 1$, während für Acetylen $n = 0$ ist. Das Allylen hat also auf drei Kohlenstoffatomen nur vier Wasserstoffatome, und wir müssen ein Kohlenstoffatom herausheben, um seine Formel aufzustellen $(CH)\equiv C-(CH_3)$. Die weiteren Glieder heißen Crotonylen, Valerylen, Hexoylen &c.

In der angedeuteten Weise schreiten nun auch die Reihen selbst fort. Es gibt z. B. eine **Diacetylenreihe**, C_nH_{2n-6}, von der das Glied für $n=6$, also C_6H_6, Dipropargyl genannt, in der Struktur so zu schreiben ist: $(CH)\equiv C-(CH_2)-(CH_2)-C\equiv(CH)$. Es sind hier zwei dreifache Bindungen vorhanden, weshalb dieser Stoff, in welchem Kohlenstoff und Wasserstoff zu gleichen Teilen verbunden sind, außerordentlich unbeständig sein muß.

Mit diesem Stoffe C_6H_6 sind wir an der Grenze der Kohlenwasserstoffe der Fettreihen angekommen. **Von der gleichen Zusammensetzung ist das Benzol, das den aromatischen Reihen ebenso voransteht wie das Methan den Fettkörpern.** Die beiden großen Abteilungen der organischen Verbindungen gehen also ganz unmerklich ineinander über und die Grenze ist nur aus praktischen Gründen ziemlich willkürlich gezogen. Wir betonten immer in

diesem Werke, daß die Abgrenzungen der Gebiete von Naturerscheinungen, wie wir sie anzunehmen gewohnt sind, von der Natur nicht geschaffen wurden.

Die reinen Kohlenwasserstoffe der Fettreihe, mit denen wir uns bisher beschäftigt haben, stellen bereits eine ganz ansehnliche Zahl von Verbindungen, obgleich nur zwei Elemente in ihnen verbunden sind. Die Natur ist unerschöpflich in ihrer Kombinationsfähigkeit.

Die meisten der hier angegebenen Kohlenwasserstoffe lassen sich aus den Steinkohlen gewinnen. Das aus den Petroleumbohrlöchern entweichende Gas ist ein Gemisch von verschiedenen Kohlenwasserstoffen der unteren Glieder der hier aufgeführten Reihen, die alle einen niedrig liegenden Siedepunkt haben und deshalb bei normaler Temperatur flüchtig bleiben. Die Gase entweichen oft in riesigen Mengen, ganz besonders in den nordamerikanischen Petroleumbezirken, in welchen die Stadt Pittsburg von dem natürlichen, aus der Erde direkt aufgefangenen Gas beleuchtet wird und Eisenwerke mit ihm gespeist werden. Daß das in Steinkohlengruben auftretende, die schlagenden Wetter verursachende Gas Methan Sumpfgas ist, haben wir schon erfahren. Gelegentlich entzünden sich auch die aus den Gasquellen zutage tretenden Gase von selbst und bilden riesige Feuersäulen, die weithin leuchten und durch ihre Wärmestrahlung rings um sich eine geradezu tropische Vegetation hervorgezaubert haben. In Baku, am Fuße des Kaukasus, und an anderen Orten jenes so überaus reichen Petroleumbezirkes gibt es seit dem Altertum diese „ewigen Feuer“, die angebetet wurden. Man baute Tempel um sie herum, aus deren Kuppeln die Flammen beständig hoch emporloderten.

Retortenofen zur Entgasung der Steinkohle.
Vgl. Text, S. 474.

Ebenso wie alle diese Erdgase, bestehen auch die Erdöle, das Petroleum, Bergöl, Naphtha u. s. w., aus einem Gemisch verschiedener Homologe der Kohlenwasserstoffreihen. In den Erdgasen können nur die niederen Homologe enthalten sein, weil diese ja allein flüchtig sind; im Erdöl dagegen trifft man gelegentlich auch die höchsten Glieder jener Reihen bis zum Paraffin an, das bei der Destillation schließlich als feste Masse übrigbleibt. Man kann also für das Petroleum keine bestimmte chemische Formel angeben, sondern nur sagen, daß dasselbe sich nach den allgemeinen Formeln C_nH_{2n+2} und auch nach C_nH_{2n} aufbaut, daß es also ein Gemenge von Kohlenwasserstoffen von der Methan- und der Äthylenreihe ist. Es ist die Regel, daß in den tieferen Erdschichten, die also aus einer älteren Periode der Erdentwickelung stammen, nur niedere Homologe, in den jüngeren Schichten höhere Glieder jener Reihe oder überhaupt höhere Reihen vorkommen. Die amerikanischen Rohöle, die aus sehr tiefen Schichten kommen, enthalten nur Kohlenwasserstoffe der Methanreihe, vom Äthan, ihrem ersten eigentlichen Gliede, bis zum Oktan. Das kaukasische Erdöl dagegen, das aus tertiären Schichten stammt, gehört ausschließlich

der Äthylenreihe an, die aber bis zum Paraffin geht. Die Petroleumschichten in Baku liegen nur 40—50 m unter dem Erdboden in einem räumlich beschränkten Gebiete, das ganz erstaunliche Mengen von Öl liefert, die bei neuen Bohrungen mit ungemein großer Kraft (bis zu 12 Atmosphären Druck) fontänenartig, oft 40 m hoch, ausgestoßen werden (s. die Abbildung, S. 471). Aber dieses Erdöl enthält nur verhältnismäßig wenig verwendbares Petroleum gegenüber dem aus dem pennsylvanischen Becken kommenden, weil es eben zuviel höhere Homologe der angeführten Kohlenwasserstoffreihen enthält.

Das ohne Explosionsgefahr gut brennbare Petroleum muß, wie wir leicht begreifen, eine Mischung von Kohlenwasserstoffen innerhalb bestimmter Grenzen seiner Reihenglieder sein, da die niederen Homologe sehr flüchtig sind und als Gase, mit dem Sauerstoff der Luft gemischt, heftig explodieren, während die festen Verbindungen in den Lampenbrennern nicht vergast werden, also hier nutzlos sind. Das rohe Erdöl wird deshalb einer sorgfältigen Destillation unterworfen, raffiniert. Bei diesem Prozesse werden nacheinander die verschiedenen Kohlenwasserstoffe, von den niederen zu den höheren aufsteigend, verflüchtigt und dann die brauchbaren wieder kondensiert, bis die festen, z. B. das Paraffin, übrigbleiben. Man kann also durch solche „fraktionierte Destillation" nacheinander und getrennt die verschiedenen Derivate erhalten und unterscheidet demnach leichtes und schweres Öl.



Waschturm oder Skrubber zum Reinigen des Leuchtgases. Vgl. Text, S. 474.

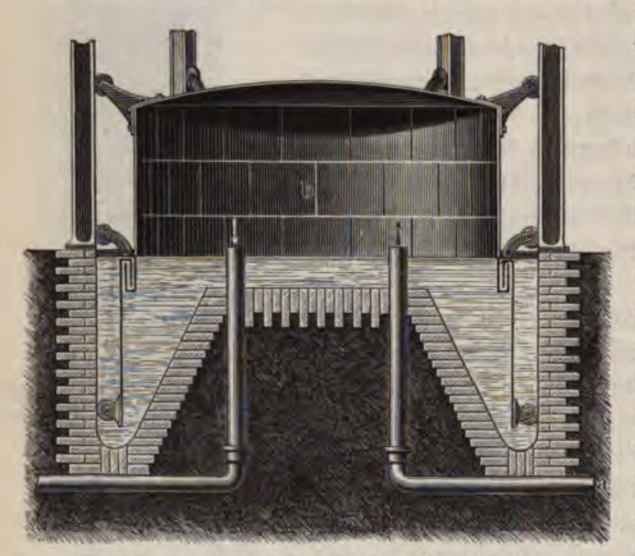
Aber die höheren dickflüssigen oder festen Kohlenwasserstoffe sind nicht nur in diesen Erdölen enthalten, sondern kommen auch selbständig in der Natur als **Asphalt** (Erdpech) oder auch als **Erdwachs** vor, das direkt zu Paraffin oder zu einem Stoffe bearbeitet werden kann, der dem Bienenwachs sehr ähnlich ist.

Petroleum läßt sich auch aus Steinkohlen herstellen, kommt auch in ihnen gelegentlich flüssig vor. Aber die eigentlichen Petroleumgebiete stehen in keinem bekannten Zusammenhange mit den Steinkohlenflözen, so daß man für beide Naturprodukte eine verschiedene Herkunft anzunehmen hat. Von Steinkohlen, Braunkohlen und Torf weiß man, daß sie verkohlte Überreste von Pflanzen sind, die ihre Körper ja hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffen aufbauen. Es ist deshalb nicht zu verwundern, wenn man Petroleum auch in den Steinkohlengruben findet. In Baku aber kommen jene ungeheuern Mengen von Erdöl in Schichten vor, die sonst keine anderen organischen Überreste einschließen, wenn man sehr vereinzelte Versteinerungen ausnimmt. Auch in der weiteren Umgebung finden sich keine Kohleablagerungen. Man darf allerdings annehmen, daß das Öl ebenso wie das Wasser im Inneren der Erde große Wege zurücklegen kann, so daß man seinen eigentlichen Ursprungsort nicht leicht entdeckt. Aber alle Umstände sprechen doch dafür, daß das Erdöl ein **Zersetzungsprodukt tierischer Substanzen** ist, die gleichfalls Kohlenwasserstoffe in Menge enthalten. Man beobachtet heute noch die Entstehung von Erdöl am Toten Meer, wo es auf der Wasser zuführenden Seite von den dort noch lebenden, aber nach und nach absterbenden Korallen gebildet wird und in Pfützen und Erdlöcher abfließt. Es ist ferner auffällig, daß das Erdöl fast immer mit Steinsalz vergesellschaftet

ist oder doch in der Nähe von Steinsalzlagern auftritt, die darauf hindeuten, daß es von verwesenden Meeresbewohnern herrührt.

Das bekannteste Produkt der Steinkohle ist das **Leuchtgas**, das ebenfalls als ein Gemenge von Kohlenwasserstoffen anzusehen ist, aber meist fast zur Hälfte aus freiem Wasserstoff (45 Prozent) besteht; nur 35 Prozent sind Methan, Sumpfgas. Diese beiden Gase zusammen würden aber eine nichtleuchtende Flamme geben, weil ihr Gemenge zu wenig Kohlenstoff enthält (s. S. 456). Erst etwa 5 Prozent Kohlenwasserstoffe der Äthylen- und Acetylenreihe machen es leuchtend, der Rest, also etwa 15 Prozent des Leuchtgases sind zurückgebliebene, für seinen Zweck unnötige Beimengungen: Kohlenoxyd, Stickstoff und Kohlensäure, von denen nur das Kohlenoxyd noch brennbar ist.

Es mag hier interessieren, etwas über die **Leuchtgasfabrikation** zu erfahren. Die dazu verwendeten Steinkohlen haben je nach ihrem Fundort einen sehr verschiedenen Gehalt an brauchbaren Gasen, ebenso wie die Erdöle sich in ihren Gemischen von Kohlenwasserstoffen unterscheiden. Das beste Rohmaterial ist, abgesehen von gewissen für die Verarbeitung günstigen äußeren Eigenschaften, dasjenige, welches den größten Gehalt an Derivaten der Acetylenreihe besitzt, weil diese wegen ihres größeren Kohlenstoffgehaltes der Flamme mehr Leuchtkraft geben. Die Newcastlekohle gibt z. B. an 10 Prozent dieser Derivate gegenüber den 5 Prozent der deutschen Kohle. Die gasförmigen Produkte der Kohle werden zunächst durch trockene Destillation ausgetrieben, indem man die zerkleinerte Kohle in den **Retortenofen** bringt (s. die Abbildung, S. 472) und unter Luftabschluß sehr stark, bis beinahe zur Weißglut, erhitzt. Während in den Retorten c die Koks zurückbleiben, entweichen die Gase durch das Abzugsrohr a, sind aber in diesem Rohzustande noch nicht verwendbar, denn sie enthalten neben den oben angeführten Stoffen zunächst eine große Zahl von Verbindungen, die in ihrer Gesamtheit den **Teer** bilden, ferner Schwefelwasserstoff, Ammoniak und Wasserdampf. Diese Stoffe sind zum Teil bei der Verbrennung giftig und müssen entfernt werden. Wasser und Teer bleiben in der Vorlage b, in welche zunächst die aus den Retorten abziehenden Gase geleitet werden. Von hier aus strömt das Gas in den sogenannten **Kondensator**, einem System von Röhren, in denen es sich abkühlt und die letzten Reste von Teer sowie Ammoniak abgibt, das von dem unten im Kühlbehälter befindlichen Wasser absorbiert wird. Nun wird das Gas von unten bei a in den sogenannten **Waschturm** oder **Skrubber** eingeführt (s. die Abbildung, S. 473), in dem sich Koks k befindet, der von oben durch eine Brausevorrichtung c beständig von Wasser durchsickert wird. Dadurch wird noch das letzte Ammoniak und andere Verunreinigung entfernt. Aber das nun bei b austretende Gas hat immer noch Schwefelwasserstoffgehalt, der auf



Durchschnitt eines Gasometers. Vgl. Text, S. 475.

das sorgfältigste beseitigt werden muß, weil sein Verbrennungsprodukt, die schweflige Säure, sehr schädlich ist. Dies geschieht in den Reinigungskasten, die in Reihen hintereinander durchströmt werden und in feiner Zerteilung in mehreren Lagen Substanzen enthalten, die jenen Schwefelwasserstoff absorbieren; dafür wird jetzt meist ein Eisenmineral, Raseneisenstein, angewendet. Nun gelangt das zum Gebrauch fertige Gas durch das Rohr a in den Gasometer b (s. die Abbildung, S. 474), eine große, unten in Wasser tauchende Eisenglocke, die je nach dem Gasdruck mehr oder weniger gehoben wird. Aus ihr wird das Leuchtgas unter bestimmtem Druck den Abnehmern zugeführt. Nebenprodukte der Gasfabrikation sind der als Heizmaterial wohlbekannte Koks, dann Teer, der früher als wertlos galt, aus dem aber heute eine große Reihe von Stoffen gewonnen werden, die uns noch vielfach interessieren, und endlich Ammoniakwasser, Salmiakgeist.

b) Alkohole.

Wir kommen nun zu ganzen Reihen neuer und zum Teil sehr interessanter und wichtiger Stoffe, wenn wir den einzelnen Gliedern der Kohlenwasserstoffreihen ein Atom Sauerstoff hinzufügen. So wird aus Methan, Sumpfgas (CH_4), Holzgeist mit der Formel CH_4O, und aus dem flüchtigen Gase Äthan, C_2H_6, der Äthylalkohol, C_2H_6O, der im Hausgebrauch als Alkohol oder Weingeist bekannt ist. Um in der Strukturformel für den Holzgeist alle Atome zu sättigen, müssen wir sie folgendermaßen schreiben: $(CH_3)-O-H$. Die letzten beiden Glieder $-OH$, die wir bereits als das einwertige Pseudoelement Hydroxyl kennen gelernt haben, ist für alle Alkohole charakteristisch. Wir erhalten die Formel des Weingeistes $(CH_3)-(CH_2)-OH$ und können nun nach obigen Angaben theoretisch ohne weiteres ebensoviel Alkohole aufbauen, als wir Kohlenwasserstoffe kennen lernten. Praktisch ist auch eine große Zahl erzeugt worden, von denen der Holzgeist, der Weingeist und das Fuselöl am bekanntesten sind. Um den Schematismus dieser Verbindungen noch deutlicher zu machen, ist eine Anzahl derselben hier angeführt:

			Siedepunkt	Hergestellt aus:
Methylalkohol (Holzgeist) . .	CH_4O	$=(CH_3)\quad -OH$	66°	Holzteer
Äthylalkohol (Weingeist) . .	C_2H_6O	$=(CH_3)-(CH)_2\ -OH$	78	Zucker
Propylalkohol	C_3H_8O	$=(CH_3)-(CH_2)_2-OH$	97	Weinfuselöl
Amylalkohol (Fuselöl) . . .	$C_5H_{12}O$	$=(CH_3)-(CH_2)_4-OH$	132	Kartoffelfuselöl
Heptylalkohol	$C_7H_{16}O$	$=(CH_3)-(CH_2)_6-OH$	175	Rizinusöl
Cetylalkohol	$C_{16}H_{34}O$	$=(CH_3)-(CH_2)_{15}-OH$	344	Walrat

Auch bei diesen Alkoholen rückt mit dem Hinzutreten der CH_2-Gruppen der Siedepunkt stufenweise immer höher; die Verbindungen werden also immer widerstandsfähiger und träger.

In den Strukturformeln der Alkohole ist die Gruppe CH_2-OH charakteristisch; man nennt sie deshalb die Alkoholgruppe. Durch Verdoppelung und Verdreifachung dieser Alkoholgruppen entstehen wieder neue, zwei- und dreiwertige Alkohole, zu denen unter anderm das Glyzerin gehört, mit der Zusammensetzung $C_3H_8O_3$ und der Strukturformel $(CH_2-OH)-(CH-OH)-(CH_2-OH)$.

Die allgemeinen Eigenschaften des Weingeistes, des Hauptrepräsentanten der Alkoholgruppen, können wir wohl als bekannt voraussetzen. In chemischer Hinsicht haben wir zu erwähnen, daß Weingeist oder kurzweg Alkohol sich mit Wasser ähnlich verbindet, wie wir es schon bei den anorganischen Säuren wahrnahmen. Alkohol gibt das Wasser nie ganz ab; auch der sogenannte absolute Alkohol enthält noch chemisch gebundenes Wasser, das man durch

Destillation nicht entfernen kann. Eine andere wichtige Eigenschaft ist seine Lösungsfähigkeit für eine große Anzahl von Stoffen, die in Wasser unlöslich sind, zu Tinkturen.

Das Glyzerin, ein dickflüssiger, fettig-öliger, wasserheller Stoff, brennt nicht. Im reinen Zustand gefriert es zwar schon bei gleicher Temperatur mit dem Wasser; wenn man es aber mit Wasser mischt, sinkt die Gefriertemperatur sehr wesentlich, und man kann es bis gegen —30° abkühlen, ehe es fest wird. Diese Eigenschaft macht den Stoff vielfach nützlich. Ähnlich wie mit dem Gefrierpunkt steht es auch mit dem Siedepunkt des Glyzerins, der eigentlich bei 290° liegt, während wasserhaltiges Glyzerin schon mit dem ersten Wasserdampf beim Destillieren übergeht. In der Pharmazie wird es zu Salben, in der Technik zur Herstellung der Hektographenmasse u. s. w. verwendet. Seine Bildung sowie die des Alkohols selbst können wir erst später verstehen.

Die organischen Stoffe treten unter Umständen auch mit Stickstoff oder anderen Elementen in Verbindung, und alle die daraus entstehenden Derivate werden zu den organischen Verbindungen gerechnet. Wir können uns hier nur mit einem beschäftigen:

Eine der bekanntesten und gefährlichsten Verbindungen dieser Art ist das Nytroglyzerin oder Dynamit mit der Formel $C_3H_5(NO_3)_3$. Es ist also an die Stelle der drei Hydroxylgruppen, welche das Glyzerin enthält, jedesmal NO_3 oder der sogenannte Salpetersäurerest getreten. Völlig aufgelöst können wir die Formel dieses Stoffes folgendermaßen bilden:

$$
\begin{array}{l}
{}^{H-}_{H-}C-O-N{\equiv}O_2 \\
\quad\;\; | \\
H-C-O-N{\equiv}O_2 \\
\quad\;\; | \\
{}^{H-}_{H-}C-O-N{\equiv}O_2
\end{array}
$$

Überall hängen hier an den trägen Stickstoffatomen so viele Sauerstoffatome, als nur möglich sind; wir begreifen demnach, daß sie diese bei geringstem Anlasse freigeben. Dies kann ohne das Zutun eines neuen Stoffes geschehen, da nur eine andere Gruppierung der vorhandenen Atome nötig ist, um den festen Stoff ausschließlich in die Gase Kohlensäure, Wasserdampf und freien Stickstoff zu verwandeln. Durch diese Umwandlung nimmt der Stoff plötzlich ein mehr als tausendfach größeres Volumen ein, woraus sich seine explosive Kraft erklärt.

c) Säuren.

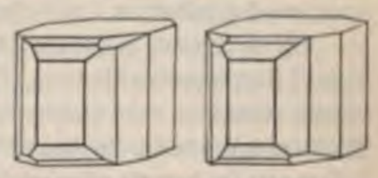
Wenn zu den bisher betrachteten Gruppen nun noch im Verhältnis zu den vorhandenen Kohlenstoffatomen ein oder mehrere Sauerstoffatome treten, entstehen die organischen Säuren, die sich ebenso wieder zu Reihen ordnen. Wie die Alkohole ihre charakteristische Gruppe haben, so gibt es auch eine solche für alle organischen Säuren, die sogenannte Karboxylgruppe, COOH, die einwertig ist: $-C{\equiv}^{O}_{OH}$. Mit ihr erhalten wir die folgende Reihe einfacher Säuren:

Ameisensäure	CH_2O_2	oder	$H-\quad COOH$
Essigsäure	$C_2H_4O_2$	„	$H-CH_2-COOH$
Propionsäure	$C_3H_6O_2$	„	$H-(CH_2)_2-COOH$
Buttersäure	$C_4H_8O_2$	„	$H-(CH_2)_3-COOH$
Valeriansäure	$C_5H_{10}O_2$	„	$H-(CH_2)_4-COOH$
ꝛc. ꝛc.			
Palmitinsäure	$C_{16}H_{32}O_2$	„	$H-(CH_2)_{15}-COOH$
Stearinsäure	$C_{18}H_{36}O_2$	„	$H-(CH_2)_{17}-COOH$
ꝛc. ꝛc.			

Wir erkennen auch hier wieder dasselbe Prinzip des Aufbaues, wie bei den vorangegangenen Verbindungen: es ist eine unveränderliche Gruppe vorhanden, in die sich mehr und mehr CH_2-Gruppen schieben. Entsprechend gibt es auch Säurereihen mit mehr Karboxylgruppen, so die Oxalsäure $C_2H_2O_4$ oder $(COOH)_2$, Bernsteinsäure $C_4H_6O_4$ oder $(CH_2)_2-(COOH)_2$, ferner die Apfelsäure $C_4H_6O_5$ und die Weinsäure $C_4H_6O_6$.

Die im chemischen Sinne sauern Eigenschaften sind um so größer, je mehr Sauerstoffatome diese Körper im Verhältnis zu den anderen Atomen enthalten. Die Ameisensäure ist also die stärkste. Sie kommt in den Ameisen und den Brennesseln als jener ätzende Saft vor, der uns schmerzlichst bekannt ist. Mit anderen Substanzen gemischt begegnet sie uns noch vielfach im Tier- und Pflanzenreich, z. B. in unserem Schweiß. Im reinen Zustand ist sie dünnflüssig, sehr sauer und rauchend und wird fast bei denselben Temperaturen wie Wasser fest und dampfförmig. Stark mit Alkohol gemischt, ist sie in dem bekannten Arzneimittel Ameisenspiritus enthalten; mit Metallen vereinigt sie sich ebenso wie anorganische Säuren zu (ameisensauren) Salzen.

Noch bekannter ist die Essigsäure, die verdünnt, abgesehen von zufälligen oder absichtlichen Beimengungen, unseren gewöhnlichen Essig gibt. Auch sie kommt mit einer ganzen Anzahl anderer organischer Säuren in den Schweißausdünstungen vor, doch können wir über ihre Entstehung gleichfalls erst später sprechen. Sie kristallisiert unter Null, schmilzt aber erst wieder bei etwa $+17^{\circ}$, pflegt daher auch als Eisessig bezeichnet zu werden. Die Buttersäure hat ihren Namen daher, weil sie in der Butter vorkommt, die indes noch mehrere andere Säuren enthält, wie die meisten organischen Stoffe Gemische vieler Verbindungen einer gleichen oder ähnlichen Reihe sind. In der Baldrianwurzel kommt die Valeriansäure vor, Palmitin- und Stearinsäure in den natürlichen Fetten. Die Oxalsäure gibt dem Klee seinen sauren Geschmack (deshalb auch Kleesäure genannt) und wurde früher aus demselben gewonnen, während sie heute aus Sägespänen bereitet wird. Das bekannte Kleesalz ist eine Kaliumverbindung dieser Säure. Ein festes Destillationsprodukt des Bernsteins ist die Bernsteinsäure, die auch im Wein und im Harn vorkommt und bei 180° schmilzt. Sie hat zwei Isomere. Der Stoff, welcher unreife Äpfel und andere Früchte sauerschmeckend macht, ist die Apfelsäure, die beim Reifen in Zucker übergeht.


Asymmetrische Weinsäurekristalle.

Noch auffälliger als schon die Apfelsäure zeigt die Weinsäure eine höchst merkwürdige und für die molekularen Zustände interessante Eigenschaft, die der verschiedenen Drehung der Polarisationsebene des Lichtes in ihren Lösungen. Es gibt eine sogenannte Rechtsweinsäure und eine Linksweinsäure, von denen die eine den Lichtstrahl nach rechts, die andere nach links dreht. Beide Stoffe haben chemisch genau gleiche Zusammensetzung, die Verschiedenheit liegt nur in einem verschiedenen Aufbau der betreffenden Moleküle. Man hat nämlich die ganz allgemeine Wahrnehmung gemacht, daß alle Stoffe, bei denen an einem darin enthaltenen Kohlenstoffatom vier verschiedene Atomgruppen hängen, die Polarisationsebene drehen. Die Strukturformel der Weinsäure ist folgendermaßen zu schreiben:

$$\begin{array}{l} H-C{<}^{OH}_{COOH} \\ \quad\; | \\ H-C{<}^{COOH}_{OH} \end{array}$$

Wir sehen, daß an beiden, nicht in den Karboxylgruppen befindlichen Kohlenstoffatomen je vier verschiedene Atome oder Gruppen hängen. Solche Kohlenstoffatome nennt man asymmetrisch. Mit dem inneren Zusammenhange dieser chemischen Tatsache mit der optischen Eigenschaft der Drehung werden wir uns erst im Kapitel 7 befassen. Aber wir wollen hier folgende höchst merkwürdige Wahrnehmung erwähnen: Man kann mit dieser Weinsäure ein Salz bilden, das in Kristallen von der oben abgebildeten Form ausscheidet. Beide Kristalle sind einander sonst ganz gleich, nur haben sie an einer Seite eine Abschrägung, die die eine Kristallform zum Spiegelbild der anderen macht. Bekanntlich können Spiegelbilder durch irgendwelche Drehung nicht zur Deckung gebracht werden. Sucht

man nun die beiden Arten von Kristallen zusammen und macht von jeder eine besondere Lösung, so dreht die eine den Lichtstrahl nach rechts, die andere nach links. Wir sehen hieraus, welch tiefer Zusammenhang zwischen den ins Auge springenden wunderbaren Kristallformen und dem wohl ewig unsichtbar bleibenden Gefüge der Atome im Molekül, die nur das Auge des forschenden Geistes zu sehen vermag, und wiederum mit den physikalischen Eigenschaften besteht. Die Natur gibt namentlich in dem vorliegenden Fall der Weinsäure einen klaren Fingerzeig, welch großen Einfluß die mangelnde Symmetrie im Aufbau des Moleküls auf das physikalische Verhalten der Stoffe hat.

Als Verbindung der Weinsäure ist der Weinstein bekannt, den man bekanntlich in Weinfässern findet, in denen der Wein lange lagerte. Er entsteht, wenn ein Wasserstoffatom der Säure durch ein Kaliumatom ersetzt wird, hat also die Formel $C_4H_5O_6K$.

Ein ganz ähnliches optisches Verhalten wie die Weinsäure zeigt auch die Milchsäure.

Die Zitronensäure ist bei normaler Temperatur fest und hat einen angenehm säuerlichen Geschmack. Sie wird aus Zitronen und anderen Früchten gewonnen, die auch im reifen Zustande keinen ganz süßen Saft erzeugen, sondern etwas säuerlich bleiben, wie die Johannisbeere, die Stachelbeere u. s. w. In ihr sind drei Karboxylgruppen vereint.

Die im Olivenöl enthaltene Ölsäure hat auf 18 Atomen Kohlenstoff nur 2 Atome Sauerstoff mit einer doppelten Bindung. Durch deren Sprengung und durch Einsetzung von Wasserstoffatomen würde man einen stearinartigen Körper erhalten, der fest ist. Die Ölsäure erstarrt schwer, schmilzt aber erst wieder bei etwa 14°. Sie gehört zu den ungesättigten Säuren, weil ein Kohlenstoffatom in ihr doppelt gebunden sein muß und deshalb leicht eine andere Verbindung eingeht.

Es gibt noch eine ganze Reihe von Ölsäuren, die vielfach Verwendung finden, so die Linolsäure, die zwei Wasserstoffatome weniger hat als die eigentliche Ölsäure, also $C_{18}H_{32}O_2$ zu schreiben ist, oder die ein Sauerstoffatom mehr führende Rizinusölsäure $C_{18}H_{34}O_3$.

d) Äther, Ester und Fette.

Äther nennt man bestimmte Isomere der Alkohole, in denen die Hydroxylgruppe nicht vorkommt. So haben wir im Gegensatz zum Weingeist (Äthylalkohol) $C_2H_6O = (CH_3)-(CH_2)-OH$ den Methyläther $C_2H_6O = (CH_3)-O-(CH_3)$; dem Butylalkohol $C_4H_{10}O = (CH_3)-(CH_2)_3-OH$ entspricht der Äthyläther (gewöhnlicher Äther) $C_4H_{10}O = (CH_3)-(CH_2)-O-(CH_2)-(CH_3)$ u. s. w.

Charakteristisch für diese einfachen Äther ist das zwischen den Gruppen alleinstehende O.

Äthyläther, im gewöhnlichen Leben einfach Äther genannt, ist eine dünnflüssige, infolge seines schon bei 35° liegenden Siedepunktes sehr feuergefährliche Substanz. Auch hier zeigt sich wieder der große Einfluß der Atomgruppierungen auf die physikalischen Eigenschaften: der mit ihm in der Anzahl der betreffenden Atome genau gleiche Butylalkohol siedet erst bei 116°. Das in der Formel der Äther freistehende Sauerstoffatom, welches bei den Alkoholen an ein Wasserstoffatom gebunden ist, deutet die geringere Widerstandsfähigkeit der Äther an. Er verdunstet bereits bei gewöhnlicher Temperatur, ohne zu sieden, und läßt dabei eine bedeutende Verdunstungskälte zurück, weshalb er zu Kältemischungen benutzt wird. Ferner ist sein Gebrauch als Anästhetikum bekannt, da seine Dämpfe schneller als die des gewöhnlichen Alkohols berauschen und dadurch bewußtlos machen.

Läßt man auf einen Alkohol eine Säure wirken, gleichviel, ob diese eine Mineral- oder eine organische Säure ist, so verbindet sich der Säurerest (s. S. 458) mit dem Alkoholradikal,

und es entsteht ein sogenannter **Ester** mit einem oder mehreren Molekülen Wasser. Diese Ester entsprechen also den Salzen der Mineralverbindungen. Wir haben gesehen, daß in jedem Alkohol die Hydroxylgruppe OH vorkommt und in jeder organischen Säure die Karboxylgruppe COOH. Die Verbindung geschieht nun in der Weise, daß an die Stelle des H in jeder Karboxylgruppe der Alkohol ohne sein Hydroxyl tritt, während sich dieser mit dem von der anderen Gruppe abgestoßenen H zu H_2O verbindet. Also z. B.:

```
    H                     H   H   H
    |                     |   |   |
H - C - C - O - [H + H - O] - C - C - C - H
    |   ||                    |   |   |
    H   O                     H   H   H
```

Essigsäure + Butylalkohol = Wasser + Essigsäurebutylester.

Auf diese Weise kann man bei der Vielartigkeit der Alkohole und Säuren eine große Menge von Esterarten erzeugen, die zum Teil sehr interessante Eigenschaften haben und in der Natur eine hervorragende Rolle spielen. So sind alle **Fruchtessenzen** Ester: Ananasäther ist Buttersäureäthylester $C_4H_7OOC_2H_5 = C_6H_{12}O_2$, Aprikosenäther ist Buttersäureamylester $C_4H_7OOC_5H_{11} = C_9H_{12}O_2$, Äpfeläther ist Valeriansäureamylester $C_5H_9OOC_5H_{11} = C_{14}H_{20}O_2$, Rheinweinblume ist Önanthsäureäthylester $C_6H_{13}OOC_2H_5 = C_9H_{18}O_2$. Auch bei den Estern tritt überall eine **charakteristische Gruppe** COO auf, die zweiwertig ist.

Wir sehen hier, wie auch diese, den Geruchssinn wie den Geschmack entzückenden Säfte immer wieder nur aus jenen drei Elementen zusammengesetzt sind, die wir in der Kohle und im Wasser vor uns haben. Es erscheint uns fast unglaublich, daß alle diese verschiedenen Stoffe, die wir durch den Geruch sofort deutlich unterscheiden, nur durch die Anzahl und die Gruppierung derselben wenigen, an sich geschmack- und geruchlosen Stoffe entstehen, und es gehörte wirklich das Zeugnis des Chemikers dazu, der inzwischen diese Fruchtessenzen aus diesen wenigen Bausteinen, die er in ihren natürlichen Verbindungen fand, wieder aufzubauen gelernt hat, um an solchen Wundern nicht mehr zweifeln zu müssen.

Auch die **mehrwertigen Alkohole** bilden Ester, von denen die **Glyzerinester** von besonderer Bedeutung sind, weil sie die **fetten** (nicht aromatischen) **Öle** und die natürlichen **Fette** bilden. Die Formel des Glyzerins ist, wie wir sahen, $C_3H_5(OH)_3$; es müssen hier also drei Säurereste an die Stelle der drei Hydroxyle treten, und es werden dann drei Moleküle Wasser frei. Verbinden wir demnach das Glyzerin mit der Buttersäure, die die Formel $C_3H_7(COOH)$ hat, so entsteht die Verbindung $C_3H_5(OC_4H_7O)_3 + 3H_2O$, nämlich einmal $C_3H_5O_3$, d. h. Glyzerin ohne das dreifache Wasserstoffatom in seinen Hydroxylen, und dreimal der Butylsäurerest C_3H_7CO, wobei die drei von ihm abgetrennten OH sich mit den drei H vom Glyzerin vereinigen. Im ganzen setzt sich also dieser Stoff zusammen aus $C_{15}H_{26}O_6$; man nennt ihn mit seinem vollen Namen **Buttersäureglyzerinester** oder abgekürzt **Butyrin**. Unsere **Kuhbutter** besteht im wesentlichen aus ihm, enthält aber auch höhere **Glyzeride**.

Alle übrigen Fette und fetten Öle setzen sich in derselben Weise zusammen, gehören also einer Reihe von der Form $C_nH_{2n}-4O_6$ an.

Wenn man **Butter** an der Luft stehen läßt, so wird sie mit der Zeit **ranzig**. Die Verbindung nimmt dabei das bei dem eben geschilderten Prozeß freigewordene Wasser aus der Luft wieder auf, wodurch sich die beiden ursprünglichen Bestandteile, das Glyzerin und die Fettsäure, trennen. Letztere ist es, welche jenen ranzigen Geschmack gibt.

Es ist klar, daß man aus einem Gemisch von verschiedenen Glyzeriden, wie es in den natürlichen Fetten vorliegt, diejenige Verbindung herausnehmen kann, die man zu haben wünscht, ganz ebenso, wie man aus den vielen Kohlenwasserstoffen, die das rohe Erdöl enthält, diejenigen auswählt, die wir als Petroleum verwenden. Deshalb ist es nicht unverständlich, daß man aus Rindstalg durch entsprechende Behandlung eine künstliche Butter, die Margarine, herstellt und als Nahrungsmittel benutzt. Bei sorgfältiger Behandlung ist solche Butter auch chemisch von natürlicher nicht zu unterscheiden. Damit dies indes zu Kontrollzwecken möglich ist, wurde gesetzlich für die in den Handel kommende Kunstbutter der Zusatz eines bestimmten Öles (Sesamöl) verlangt, das den Geschmack der Butter nicht verändert, aber chemisch leicht nachzuweisen ist.

Fette sind, wie wohl allgemein bekannt ist, im Wasser vollkommen unlöslich, aber sie können in mikroskopisch kleinen Kügelchen darin festgehalten werden, namentlich, wenn man das Wasser mit einer schleimigen Substanz, Eiweiß, Gelatine, dickflüssiger macht. So entstehen die Emulsionen, von denen die Milch eine natürliche Butteremulsion darstellt, deren Eiweißgehalt den Käse gibt.

Es gibt flüssige, weiche und feste Öle. Die flüssigen bilden die eigentlichen fetten Öle: Olivenöl, Baumöl, Rüböl, Tran oder Leinöl, Nußöl, Mohnöl. Weiche Fette, Schmalze, kommen in fleischfressenden Säugetieren und Vögeln vor, während die festen Fette, Rindstalg u. s. w., von Pflanzenfressern erzeugt werden. Auch das Stearin gehört in diese Reihe, und ebenso muß man Wachs zu den Fetten rechnen, obwohl es nicht vom Glyzerin herkommt, sondern ein noch höherer Ester ist.

Aus den Fetten werden als Verbindungen der Fettsäuren mit Kali oder Natron die Seifen hergestellt. Da die natürlichen Fette Verbindungen verschiedener Fettsäuren (alle bisher genannten organischen Säuren sind Fettsäuren) mit Glyzerin sind, so kann man eine zusammenfassende Formel für die natürlichen Fette derartig schreiben, daß man wieder dem Fettsäureradikal eine besondere Bezeichnung gibt, für welche wir [F] wählen wollen, das allgemein $= C_nH_{2n-1}O$ entspricht. Dann haben die natürlichen Fette die allgemeine Formel $C_3H_5(O[F])_3$. Setzt man diesen nun Kaliumhydrat, K(OH), Kalilauge, zu, so nimmt das stärkere Kalium die Säure für sich in Anspruch, während sein Hydroxyl sich mit dem Rest des Fettes wieder zu Glyzerin vereinigt. Es entsteht aus:

$$\underset{\text{Fett}}{C_3H_5(O[F])_3} + \underset{\text{Kalilauge}}{3K(OH)} = \underset{\text{Seife}}{3K(O[F])} + \underset{\text{Glyzerin.}}{C_3H_5(OH)_3}$$

Die so gebildete Seife bleibt mit dem Glyzerin gemischt und deshalb weich; es ist die bekannte Schmierseife, die meist von den verwendeten billigen Fetten (auch Fischtran) eine dunkle Farbe und übeln Geruch hat und oft entsprechend gefärbt als grüne oder gelbe Seife in den Handel kommt.

Nimmt man statt Kalilauge Natronlauge, Na(OH), so entsteht ein Produkt, das in Salzwasser unlöslich ist; man kann es also dadurch ausfällen und erhält die feste Hausseife, während in dem Rückstande, der Unterlauge, das Glyzerin verbleibt. Die verschiedenen Fette oder Öle liefern die harten Seifen.

Fettsaure Verbindungen des Bleies, mit Glyzerin vermischt, geben die Pflaster.

Es mag schließlich noch erwähnt werden, daß das Nitroglyzerin (Dynamit) ein echter Salpetersäureester ist, also seinen chemischen Namen nach der heute üblichen Bezeichnungsweise mit Unrecht trägt.

e) Aldehyde und Ketone.

Es ist hier noch von einer Klasse von Körpern zu reden, die in neuerer Zeit vielfach Verwendung gefunden haben und für die zukünftige Entwickelung der Chemie wahrscheinlich eine hervorragende Bedeutung gewinnen werden. Es sind die Aldehyde und Ketone.

Man kann die Alkohole in primäre, sekundäre, tertiäre einteilen, je nachdem sie ein, zwei oder mehrere Methylgruppen, CH_3, enthalten, deren Strukturformeln also folgendermaßen aussehen:

$$CH_3-C\begin{cases}H\\H\\OH\end{cases} \qquad \begin{matrix}CH_3\\CH_3\end{matrix}\!\!>C<\!\!\begin{matrix}H\\OH\end{matrix} \qquad \begin{matrix}CH_3\\CH_3\\CH_3\end{matrix}\!\!\geq C-OH$$

Äthylalkohol   Propylalkohol   Butylalkohol.

Der erste enthält zwei, der zweite ein, der dritte kein Wasserstoffatom, das allein mit dem Kohlenstoff gebunden ist. Die große Anziehungskraft des Wasserstoffs zum Sauerstoff, die namentlich zur Wasserbildung drängt, macht es beim Äthylalkohol möglich, durch Hinzufügung eines Sauerstoffatoms die beiden alleinstehenden Wasserstoffatome aus dem Molekül herauszureißen, worauf sich das an den dritten Wertigkeitspunkt des Kohlenstoffs gebundene Hydroxyl spaltet, so daß sein Sauerstoff doppelt mit dem Kohlenstoff verbunden wird. Es entsteht aus

$$CH_3-C\begin{cases}H\\H\\OH\end{cases} + O = CH_3-C\begin{cases}O\\H\end{cases} + H_2O$$

Äthylalkohol + Sauerstoff = Äthylaldehyd + Wasser.

Man nennt den entstehenden Stoff C_2H_4O ein Aldehyd, ein Name, der eine Abkürzung ist von Alkohol dehydrogenatus und demnach bedeutet, daß dem Alkoholmolekül Wasserstoff genommen ist. Die Aldehyde unterscheiden sich von den Alkoholen durch einen Mindergehalt von zwei Wasserstoffatomen und anderseits von den Säuren durch das Fehlen eines Sauerstoffatoms. Denn Äthylaldehyd + 2H ist Äthylalkohol, Äthylaldehyd + O = Essigsäure.

Bei den sekundären Alkoholen entsteht durch Hinzufügung von O gleichfalls Wasser, wenn das eine alleinstehende H mit dem im Hydroxyl enthaltenen weggenommen wird. Das übrigbleibende O wird dann wieder zweifach an C gebunden:

$$\begin{matrix}CH_3\\CH_3\end{matrix}\!\!>C<\!\!\begin{matrix}H\\OH\end{matrix} + O = \begin{matrix}CH_3\\CH_3\end{matrix}\!\!>C=O + H_2O.$$

Den neu entstandenen Stoff C_3H_6O nennt man ein Keton.

Bei dem tertiären Alkohol ist eine ähnliche Verwandlung nicht möglich, weil kein alleinstehendes Wasserstoffatom mehr in ihm enthalten ist.

Die Aldehyde haben als Zwischenstufen zwischen Alkoholen und Säuren das lebhafte Bestreben, sich weiter mit Sauerstoff zu vereinigen, und entziehen ihn manchen anderen Stoffen. Hierauf beruht ihre kräftig desinfizierende Eigenschaft; sie nehmen aus organischen Stoffen Sauerstoffatome, wo es nur immer möglich ist, und bringen dadurch die Verbindung zum Zerfall oder zerstören die angegriffenen Mikroorganismen.

Für alle Aldehyde ist COH die charakteristische Gruppe. Von ihnen nennen wir nur den Formaldehyd, CH_2O oder H-COH, und den Paraformaldehyd, der aus einem dreifachen Molekül des vorigen besteht $(H-COH)_3$. Läßt man Formaldehyd, in Holzgeist gelöst (im gewöhnlichen Leben Formalin genannt), verdampfen, so bringt er in alle Fugen und Poren des von dem Dampf erfüllten Raumes ein und zerstört die vorhandenen Mikroorganismen. Zur Desinfektion findet er darum sehr viel Verwendung.

Acetaldehyd oder *Essigsäurealdehyd*, C_2H_4O, interessiert uns insofern, als aus ihm drei bekannte und vielfach medizinisch verwendete Stoffe entstehen. Bei den meisten organischen Verbindungen, die einzeln stehende H-Atome führen, kann man durch passende Einwirkungen dieses gegen ein Cl-Atom vertauschen, d. h. die Verbindung chlorieren. Unser Acetaldehyd schreibt sich eigentlich CH_3-COH. Ersetzen wir die drei H der Methylgruppe CH_3 durch drei Cl, so haben wir CCl_3-COH, *Trichloraldehyd*, oder abgekürzt *Chloral*, das bekannte *Schlafmittel*, vor uns.

Durch Einwirkung von Natriumhydroxyd gelingt es, aus dieser Verbindung noch CO zu entfernen; es bleibt dann CCl_3-H, das *Trichlormethan* oder *Chloroform*, dessen Wirkung als *Anästhetikum* bekannt ist. Wegen des Chlorgehalts ist seine Anwendung nicht ungefährlich, weshalb man in neuerer Zeit wieder mehr zum Äther zurückkehrt.

Dieselben chemischen Einwirkungen können nun auch mit Jod statt mit Chlor vorgenommen werden, wodurch dann *Jodoform*, CHJ_3, entsteht, das bei Wundbehandlung als *Antiseptikum* angewendet wird. Jodoform ist fest, Chloroform eine farblose Flüssigkeit.

f) Kohlehydrate.

Diese Verbindungen des Kohlenstoffs mit Wasserstoff und Sauerstoff gehören zu den wichtigsten im Haushalte der Natur, weil sie den größten Teil unserer Nahrungsmittel liefern. Man nennt sie eigentlich mit wenig Berechtigung *Kohlehydrate*, weil sie *neben beliebig vielen Kohlenstoffatomen immer doppelt soviel Wasserstoffatome als Sauerstoffatome* enthalten. Ihre Formel ist $C(H_2O)_n$. Da H_2O Wasser ist, so spricht man hier von Verbindungen mit Wasser, obgleich dies nicht so zu verstehen ist, wie wenn Schwefelsäure oder Alkohol Wasser in sich aufnehmen. Es sind nur in diesen Verbindungen wie zufällig doppelt soviel H als O vorhanden, aber sie liegen nicht nebeneinander und sind nicht in den betreffenden Molekülen zu Wasser verbunden. Daß die Natur gerade diese Verbindungen so zahlreich hervorbrachte, ist gewiß kein Zufall, denn sie hat das Wasser überall zur Hand und benutzt seine auf geheimnisvolle Weise zerlegten Teile wieder zum Aufbau ihrer wertvollsten Stoffe, die sie als Nahrungsmittel in möglichst großen Mengen hervorzubringen hat.

Vor allem gehören in diese Klasse die verschiedenen *Zuckerarten*. *Traubenzucker* hat die Formel $C_6H_{12}O_6 + H_2O$, wobei dieses letzte Glied H_2O besagt, daß neben den anderen Bindungen von H und O diese eine allein als physikalisch im Kristallwasser gebundenes Wasser bestehen bleibt. Man könnte die Strukturformel des Zuckers folgendermaßen schreiben:

```
    H   H       H             H       H   H
    |   |       |             |       |   |
H - C - O - C - [O - C - O] - O - [O - C - O] - C - O - C - H
    |   |       |             |       |   |
    H   H       H             H       H   H
```

Diese Formel, in der das Wassermolekül enthalten ist, ist vollkommen symmetrisch. Die beiden in Rechtecke eingeschlossenen Gruppen sind Kohlensäure CO_2. Scheiden diese durch irgend einen Umstand aus, so können sich, wie durch die Pfeile angedeutet ist, zwei von den vier H, die bei der Bildung der Kohlensäure von den Kohlenstoffatomen losgelöst werden, mit dem mittleren Sauerstoffatom zu Wasser verbinden, und die beiden anderen H treten zu den beiden nun getrennten Atomgruppen rechts und links. Jede dieser Gruppen ist dann C_2H_6O, d. h. Weingeist. Wir sehen also, daß der Traubenzucker, ohne daß wir von ihm etwas hinwegnehmen oder hinzutun, in *Weingeist, Kohlensäure und Wasser zerfallen kann*, und dies ist in der Tat der

Vorgang, nach welchem aus den süßen Trauben, deren Genuß nicht berauscht, der Wein mit seiner perlenden Kohlensäure entsteht. Wir haben $C_6H_{14}O_7 = 2C_2H_6O + 2CO_2 + H_2O$.

Aber dem Chemiker würde im Laboratorium diese Zerlegung durch seine gebräuchlichen Methoden niemals gelingen, mit denen er so viele Stoffe verbindet und wieder scheidet. Bei dieser Zersetzung muß notwendig ein ganz bestimmter Mikroorganismus mitwirken, der Hefepilz, der allerdings überall in der Luft vorkommt und da, wo er den erwünschten Nährboden findet, sofort an sein Gärungsgeschäft geht, durch welches er Zersetzungen, die kein bloßes chemisches Mittel zu stande bringt, wie ganz von selbst bewirkt.

Wie Wein bereitet wird, weiß jedermann. Man preßt den süßen Saft der Trauben aus und überläßt ihn sich selbst in offenen Fässern. Die in diesem Most mitenthaltenen oder aus der Luft aufgenommenen Hefepilze vermehren sich bei der niedrigen Kellertemperatur, in der die Gärung vor sich geht, nur langsam; der Wein wird dadurch besser. Der Prozeß dauert darum im kühlen Raume mehrere Monate, während man ihn bei höheren Temperaturen wesentlich beschleunigen kann. Bei der Gärung entweicht die Kohlensäure und entwickelt dabei eine so unwiderstehliche Kraft, daß mit Most gefüllte, verschlossene Fässer bald auseinanderplatzen würden. Um dem Weine seine Kohlensäure zu erhalten, füllt man den Most in Flaschen, die den entstehenden Druck zu ertragen vermögen, und erzielt so die mussierenden Weine (Schaumweine). Nach vollendeter Gärung hat sich am Boden des Fasses ein schlammiger Niederschlag von Hefe abgesetzt, der es nötig macht, den Wein in andere Fässer zu füllen, die nun verschlossen werden.

Weißer und roter Wein unterscheidet sich nicht etwa durch die Herkunft von verschiedenfarbigen Trauben. Man kann ebensogut weißen Wein auch aus roten Trauben herstellen, denn die Farbe ihres Saftes ist von dem der weißen Trauben nicht verschieden. Beim roten Wein aber läßt man die Schalen und Stengel bei der Gärung mit im Most liegen, wodurch der rote Wein nicht nur seine Farbe, sondern auch seine zusammenziehenden Eigenschaften erhält.

In unseren deutschen Weingebieten genügt die Durchschnittstemperatur nicht, um die Trauben sehr süß zu machen, weshalb aller im Most enthaltene Zucker bei der Gärung in Alkohol verwandelt werden kann. Die Weine werden kräftig und nicht süß, gleichzeitig bilden sich auch jene höheren Ester in geringen Mengen, die z. B. dem Rheinwein seine Blume geben. Aber die Bindungen der drei hier allein mitwirkenden Elemente zu jenen komplizierteren Molekülen erfordert meist lange Jahre Zeit: der Wein erhält seine schönste Blume erst durch langes Lagern. Die Trauben südlicher Länder dagegen enthalten einen Überschuß an Zucker, der bei der Gärung nicht mehr in Alkohol verwandelt wird; die Weine bleiben süß. Da aber jene höheren Alkohole keine Gelegenheit haben, sich zu bilden, haben die Südweine meistens keine Blume.

Man kann aus jedem Zucker ein gegorenes, alkoholhaltiges Getränk bereiten, so auch aus dem Bienenhonig den Met. Apfelwein, Johannisbeerwein, Stachelbeerwein u. s. w. werden in gleicher Weise wie Traubenwein hergestellt.

Läßt man alkoholige Getränke längere Zeit offen stehen, so werden sie sauer; auf diese Weise erhält man bekanntlich den Essig. Soll Weingeist, C_2H_6O, in Essigsäure, $C_2H_4O_2$, übergehen, so müssen 2O hinzutreten, von denen das eine O sich mit 2H des Weingeistes zu H_2O verbindet und das andere O an die Stelle dieser 2H tritt. $C_2H_6O + 2O = C_2H_4O_2 + H_2O$. Jene 2O nimmt der Weingeist aus der Luft auf. Aber auch diese Umwandlung geschieht nur in Gegenwart eines bestimmten „Fermentes“, in diesem Falle der sogenannten „Essigmutter“, welche den Gärungsprozeß bewirkt. Bei übernormaler Wärme geht er schneller vor sich als bei Kellertemperatur, bei der sich die Weingärung vollzieht. Durch diese langsame Gärung

im Keller und in den Wintermonaten bewahrt man den Wein vor dem Sauerwerden. Dagegen haben die Bierbrauer im Sommer große Schwierigkeiten, die Essiggärung zu vermeiden und müssen besondere Kühlvorrichtungen anwenden. In geschlossenen Gefäßen werden aber die Getränke nicht sauer, weil die Essiggärung abweichend von der Weingärung Sauerstoff aus der Luft aufnehmen muß, während der Most Sauerstoff (in der Kohlensäure) ausscheidet. Deshalb muß der gegorene Wein rechtzeitig, nicht zu früh und nicht zu spät, in verschlossene Fässer oder auf Flaschen gefüllt werden.

Bei den Gärungsprozessen wirken verschiedene Pilzarten mit. Die Bierhefe (s. die untenstehende Abbildung) ist verschieden von der des Weines, und der bei der Essigbildung mitwirkende Pilz ist wieder ein anderer. Die Pilze vermehren sich während der Gärung sehr und werden durch sie in keiner Weise verändert. Da allein ihre Gegenwart jene chemische Umsetzung bewirkt, sind wir versucht, zu glauben, daß hier physikalische Ursachen im wesentlichen mitsprechen. Darum ist es interessant, zu erfahren, daß die Überführung des Weingeistes in Essig auch durch die Gegenwart des uns schon bekannten Platinschwammes (s. S. 129) gelingt, dessen äußerst fein verteilter Zustand die betreffenden Stoffe so sehr zu verdichten vermag, daß sich die nötigen Sauerstoffatome an die Moleküle des Weingeistes angliedern. Vielleicht spielen die feinen Poren der Zellgewebe jener Mikroorganismen eine ähnliche Rolle. Wir kommen auf diese und andere physiologische Vorgänge noch eingehend zurück.


Zellen der Bierhefe.

Es gibt mehrere Arten von Zucker, die sich teils durch ihren verschiedenen Gehalt jener drei Elemente, teils nur durch verschiedene Gruppierungen der Atome unterscheiden. Der Traubenzucker, von dem wir bis jetzt allein gesprochen haben, ist nicht das Produkt, welches wir im gewöhnlichen Leben als Zucker kennen. Dieses ist vielmehr der Rohrzucker, mit der Formel $C_{12}H_{22}O_{11}$, der etwas mehr Kohlenstoff im Verhältnis zu den beiden anderen Elementen enthält. Fügen wir dem Rohrzucker noch ein H_2O zu, so wird er 2 Molekülen Traubenzucker gleich, ohne dessen gebundenes H_2O. Es wird also $C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O = 2(C_6H_{12}O_6)$. Der Rohrzucker kommt nicht nur im Zuckerrohr, sondern auch in den anderen Naturprodukten vor, aus denen man Zucker gewinnt, z. B. der Zuckerrübe. Seine Herstellung aus diesen Stoffen übergehen wir, da sie im wesentlichen nur auf eine Aussonderung und Reinigung des bereits in der Rübe u. s. w. enthaltenen natürlichen Zuckers hinauskommt, die für uns chemisch nicht lehrreich ist.

Rohrzucker dreht die Polarisationsebene des Lichtes nach rechts, wodurch der Grad einer Zuckerlösung zu bestimmen ist (s. S. 284). Seine Strukturformel kann also nicht so gleichmäßig aufgebaut sein, wie wir sie für den Traubenzucker auf S. 482 fanden, es müssen in seinem Molekül ein oder mehrere unsymmetrische Kohlenstoffatome enthalten sein.

Nun fügen wir dem Rohrzucker noch eine H_2O-Gruppe hinzu und kommen zu einer Verbindung, die in der Mitte steht zwischen Rohr- und Traubenzucker: $C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O$. Man kennt von ihr zwei Isomere, den Malzzucker und den Milchzucker. Beide sind gleich 2 Molekülen Traubenzucker ohne sein gebundenes H_2O, das nach der Käsebereitung in der Molke bleibt. Der Milchzucker kann in der Wärme bei Luftzutritt durch Gärung schnell in Milchsäure übergehen, so daß die Milch sauer wird. Bezüglich der Polarisation verhalten sich Malzzucker wie Milchzucker genau so wie der Rohrzucker.

Nimmt man dem Rohrzucker eine H_2O-Gruppe, so entsteht ein Stoff, in dem die drei Elemente im Verhältnis $C_6H_{10}O_5$ verteilt sind. Diese Zusammensetzung hat unter anderm auch das hauptsächlichste aller Nahrungsmittel, die Stärke, die, wie wir wissen, in allen Pflanzenzellgeweben, besonders in der Kartoffel, vorkommt. Sie bildet kleine Körner, die bei den verschiedenen Pflanzenarten verschiedene Formen haben (s. die untenstehende Abbildung). Während es, freilich auf verwickeltem Wege, gelingt, Zucker aus seinen Bestandteilen, also nicht aus organisierten Stoffen, herzustellen, ist man trotz der genauen Kenntnis ihrer chemischen Zusammensetzung bisher nicht im stande gewesen, Stärke auf künstlichem Wege herzustellen. Die Lösung dieser chemischen Aufgabe, aus Kohle und Wasser das wichtigste Nahrungsmittel jederzeit billig zu erzeugen, ist begreiflicherweise von einschneidender kultureller Bedeutung. Die Stärke hat die Eigenschaft, in warmem Wasser aufzuquellen, während sie sich in kaltem nicht löst, und wird deshalb auch zu Kleister benutzt.



Stärkekörner. a, b der Kartoffel, c des Hafers, d der Bohne. Nach Kerner, „Pflanzenleben".

Dextrin ist der Stärke nahe verwandt und wird durch deren Erwärmen, durch einen Gärungsprozeß und auf anderen Wegen gewonnen. Im Gegensatz zur Stärke ist es in Wasser leicht löslich, seine Lösung, der Stärkegummi, ist rechtsdrehend, was ihm den Namen Dextrin (dextros, griechisch = rechts) gab.

Aus Stärke können gleichfalls alkoholische Getränke hergestellt werden, z. B. aus Gerstenstärke das Bier und aus Kartoffelstärke der Branntwein. Dabei muß die Stärke zunächst in Zucker verwandelt werden, worauf man den Zucker in bekannter Weise gären läßt.

Die Bierbereitung aus Gerste geschieht folgendermaßen: Zur Verwandlung der Gerste in Malz läßt man sie etwa eine Woche angefeuchtet im Keller liegen. Um Zucker bilden zu können, braucht die Stärke der Gerste nur noch ein Molekül Wasser, das sie unter dem Einfluß eines besonderen Gärungserregers erhält, den man Diastase nennt, wobei die Gerste zu keimen beginnt. Diese Keime werden entfernt und die Gerste getrocknet, die in diesem Zustand Malz heißt und im Gegensatz zur Stärke in Wasser löslich ist. Die Lösung läßt man gären, füllt die gärende Flüssigkeit nach einigen Tagen in Fässer und verschließt sie, um die freiwerdende Kohlensäure dem entstehenden Biere zu lassen. Hopfen wird nur des Geschmacks wegen zugesetzt, für den Biererzeugungsprozeß ist er nicht notwendig.

Oben wurde gesagt, daß die Umwandlung der Stärke in Zucker gleichfalls durch einen Gärungsprozeß, also einen Pilz, geschieht. Dieser kann demnach durch das Malz auch auf andere Stärkekörper übertragen werden, ohne daß man sie erst selbst in Malz verwandeln müßte. Quetscht man z. B. aus dem Roggen seine Stärke heraus und setzt etwas Malz hinzu,

so geschieht auch dadurch allein seine Verzuckerung, und man kann den Zucker nachher in Alkohol übergehen lassen. Das Roggenbier hat indes einen schlechten Geschmack; man destilliert deshalb seinen Alkohol heraus, der den Kornbranntwein gibt.

Ebenso kann man die Kartoffelstärke behandeln. Die gewonnene gegorene Flüssigkeit enthält noch mehr von jenen ungenießbaren Alkoholen, die wir als Fuselöl bezeichnen. Durch fraktionierte Destillation und anderweitige Behandlung gelingt es aber auch hier, einen trinkbaren Kartoffelbranntwein auszuscheiden.

Genau dieselbe Zusammensetzung wie die Stärke hat der Stoff, aus welchem die Pflanzen ihr eigentliches Skelett, die Holzfasern und die Umhüllung ihrer Zellen, die Zellulose bilden. Trotzdem ist dieser Körper völlig unlöslich in Wasser. Baumwolle, Flachs, Hanf u. s. w. und auch das Papier besteht aus ihr. Sollte man es glauben, daß Papier, das immer etwas Wasser enthält, dieselbe Mischung hat wie Zucker? Nur die Gruppierungen der Materieelemente machen ihre Eigenschaften aus.

Diese Zellulose bildet mit Salpetersäure einen Ester, der an das Dynamit erinnert und sich $C_6H_7(NO_3)_3O_2$ schreibt; es ist die Schießbaumwolle, deren explosive Natur bekannt und in derselben Weise wie die des Dynamits verständlich ist. Aus ihr wird durch Auflösung in Äther das Kollodium bereitet. Auch das bekannte, vielfach industriell benutzte Zelluloid ist in Kampfer aufgelöste Schießbaumwolle. Bei gewöhnlicher Temperatur hart und elastisch, läßt es sich aber bei Erwärmung leicht in beliebiger Weise bearbeiten, weil es dann geschmeidig wird, muß aber als ziemlich feuergefährlicher Stoff vorsichtig behandelt werden.

g) Organische Stickstoffverbindungen.

Ebenso wie wir die Kohlensäure noch zu den anorganischen Verbindungen gezählt haben, haben wir auch eine ganze Reihe von Stickstoffverbindungen in jene Kategorie genommen, obgleich ihre Stellung in einigen Fällen zweifelhaft bleiben mag. Dies ist namentlich von den Ammoniak- und Cyanverbindungen zu sagen. Schon bei ihrer Besprechung (S. 452 u. 457) haben wir erwähnt, daß sich der Salpeter nur beim Fäulnisprozeß tierischer Stoffe unter Einwirkung von Mikroorganismen bildet, also einem ganz ähnlichen Prozeß, wie der Gärung, seine Entstehung verdankt. Salpeter und das aus ihm gebildete Ammoniak müßten also, streng genommen, schon zu den organischen Substanzen gezählt werden, weil sie eben nur unter der Einwirkung von organischen Wesen entstehen. Auch die Cyanverbindungen werden nur in der organischen Natur geschaffen.

Das Ammoniak tritt mit uns bereits bekannten organischen Stoffen in Verbindungen, die im Tierreich in physiologischer Hinsicht eine wichtige Rolle spielen, wenn sie uns auch meist in nicht sehr angenehmer Weise entgegentreten.

Die erste Reihe dieser Stoffe nennt man Amine. Sie entstehen aus dem Ammoniak, NH_3, indem ein, zwei oder alle drei seiner Wasserstoffatome gegen Alkoholradikale ausgetauscht werden. Da die letzteren (Alkohol weniger sein Hydroxyl) keinen Sauerstoff enthalten, so kommen in den Aminen nur die drei Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff vor. Wir können drei verschiedene Gruppen von Aminen bilden wegen der drei austauschbaren Wasserstoffatome und nennen sie primäre, sekundäre und tertiäre Amine. So entstehen aus dem Ammoniak folgende Stoffe:

$N\begin{cases}H\\H\\H\end{cases}$	$N\begin{cases}CH_3\\H\\H\end{cases}$	$N\begin{cases}CH_3\\CH_3\\H\end{cases}$	$N\begin{cases}CH_3\\CH_3\\CH_3\end{cases}$
Ammoniak	Methylamin	Dimethylamin	Trimethylamin.

Der Stickstoff, von dem wir schon wiederholt erfahren haben, daß er sowohl drei- als fünfwertig auftreten kann, ist hier dreiwertig angenommen.

Diese Amine haben einen einerseits an Ammoniak, anderseits an Fisch, besonders Hering erinnernden Geruch und werden auch aus Heringslake gewonnen. Chemisch verhalten sie sich ganz ähnlich wie Ammoniak selbst.

Wenn wir statt des Alkoholradikals ein Säureradikal an die Stelle eines H im Ammoniak setzen, so entstehen die sogenannten **Amide**:

$$N \begin{cases} H \\ H \\ H \end{cases} \qquad N \begin{cases} C_2H_3O \\ H \\ H \end{cases} \qquad N \begin{cases} C_3H_5O \\ H \\ H \end{cases}$$

Ammoniak — Acetamid — Propionamid.

Hier haben wir zum ersten Male Verbindungen **aller vier Organogene** vor uns, wenn wir die nur nebenher aufgeführten Stoffe Dynamid und Schießbaumwolle ausnehmen, die in der Natur nicht vorkommen. Wenn wir die Gruppe NH_2 als **Amidgruppe** besonders schreiben, können wir den obigen Formeln auch die folgende Form geben: Acetamid $= CH_3{-}CO{-}NH_2$ und Propionamid $= CH_3{-}CO{-}CH_2{-}NH_2$. Es können dann z. B. noch folgende Stoffe gebildet werden: $OH{-}CO{-}NH_2$, Karbaminsäure, und $NH_2{-}CO{-}NH_2$, Karbamid.

Dieser letzte Stoff, $CO(NH_2)_2$, **Karbamid**, ist der **Harnstoff**, die erste organische Substanz, welche auf synthetischem Wege von Friedrich Wöhler 1828 (s. die Abbildung, S. 489) hergestellt wurde. Sie entsteht aus cyansaurem Ammonium, das dieselbe Zusammensetzung hat (NH_4CNO), durch bloße Veränderung der Atomlagerungen. Diese mit bewundernswertem Scharfsinn durchgeführte erste organische Synthese hat seinerzeit begreiflicherweise großes Aufsehen gemacht. Wir müssen uns aber heute doch fragen, ob diese und andere Verbindungen wirklich ohne alles Zutun lebender Organismen erzeugt worden sind, da wir ja den Salpeter nicht ohne solche herstellen. Alle die im hohen Grade bedeutenden Arbeiten der modernen Chemie, welchen es gelingt, die verwickeltsten organischen Verbindungen wieder aufzubauen, benutzen aber in letzter Linie solche Stoffe, die uns die lebende Natur, wenn auch nur als Zersetzungsprodukte, in die Hand gegeben hat.

Wenn Harn fault, so unterscheiden wir in seinem Geruch sehr deutlich das Ammoniak. In Wasser gelöster Harnstoff zerfällt bei der Fäulnis in Kohlensäure und Ammoniak: $CO(NH_2)_2 + H_2O = CO_2 + 2NH_3$. Es kann aber auch der zweiwertige Ammoniakrest NH in ähnliche Verbindungen, wie sie oben dargestellt worden sind, treten, wenn zwei H-Atome dafür ausgeschieden werden. Solche Stoffe nennt man **Imidverbindungen**.

Amidosäuren lassen sich auch bilden, wenn wir den schon oft angewendeten Ammoniakrest NH_2 an eine Säure an Stelle eines H-Atoms binden; nur darf dabei die für die organischen Säuren charakteristische Karboxylgruppe COOH nicht zerrissen werden.

$$\begin{array}{c} H \\ | \\ H{-}C{-}COOH \\ | \\ H \end{array} \qquad \begin{array}{c} H \\ | \\ H{-}C{-}COOH \\ | \\ NH_2 \end{array}$$

Essigsäure wird zu Amidoessigsäure.

Die verschiedenen Amidosäuren, welche durch solche Substitutionen entstehen, spielen wahrscheinlich eine wichtige Rolle beim **Stoffwechsel im tierischen Körper**, denn man findet sie namentlich in der Bauchspeicheldrüse der Säugetiere.

Neben den bisher aufgeführten Stickstoffverbindungen sind noch die des Cyan, CN, zu nennen, von denen wir bei den anorganischen Verbindungen das Nötigste gesagt haben (s. S. 457). Wir erinnern an die furchtbaren Gifte Blausäure, CHN, und das Cyankalium, KCN, sowie an das Blutlaugensalz, $Fe(CN)_6K_4$, u. s. w.

B. Die aromatischen Körper.

Während die Kohlenwasserstoffe der Fettkörper sich in Reihen von der Form C_nH_{2n+2} (Methanreihe), C_nH_{2n} (Äthylenreihe), C_nH_{2n-2} (Acetylenreihe), bis höchstens C_nH_{2n-6} (Diacetylenreihe) bringen lassen, beginnen die aromatischen Körper erst mit dieser letzten Reihe, deren erstes Glied C_6H_6 ist. Es folgen ihr aber weitere Reihen von aromatischen Körpern, die immer weniger Wasserstoff enthalten: C_nH_{2n-12}, C_nH_{2n-14} u. s. w. bis C_nH_{2n-22} und noch weiter darüber hinaus. Für den ersten dieser Stoffe, C_6H_6, ist es allenfalls noch möglich, eine Strukturformel in der bisher angewendeten Weise aufzustellen, wenn wir dabei zwei dreifache Bindungen benutzen. Wir würden also zu schreiben haben: $CH{\equiv}C{-}CH_2{-}CH_2{-}C{\equiv}CH$ (Dipropargyl). In diesem Aufbau gehört dieser Stoff noch den Fettkörpern an. Man kennt aber noch einen anderen Körper von derselben Zusammensetzung, das Benzol, dessen molekularer Aufbau offenbar ein ganz anderer sein muß, weil seine vielseitige Verbindungsfähigkeit zeigt, daß alle seine sechs Wasserstoffatome eine freie Stellung einnehmen, die sie in gleicher Weise austauschfähig machen; sie müssen demnach in gleichen Verhältnissen an die sechs Kohlenstoffatome gebunden sein. Dieses Verhalten mit der Vierwertigkeit des Kohlenstoffs in Einklang zu bringen, war nicht leicht. Das Vorhergehende verlangt ja, daß in der Formel für das Benzol nur die Gruppe CH, aber diese sechsmal, vorkommt. Diese Gruppe ist, wie wir sahen, dreiwertig. Es bleibt deshalb nichts anderes übrig, als die Formel folgendermaßen zu schreiben: $-CH{=}CH{-}CH{=}CH{-}CH{=}CH-$, wobei dann aber vorn und hinten eine Valenz ungesättigt ist. Nun kam Kekulé 1866 auf die gute Idee, diese beiden Valenzen mit sich selbst zu sättigen, d. h. die Kette zu einem Ringe zusammenzuschließen. Seither spricht man von einem Benzolring oder einem Benzolkern und schreibt die Strukturformel in Form eines Sechsecks, um das Freistehen der Wasserstoffatome noch deutlicher hervortreten zu lassen:

```
      H
      |
      C
H-C /   \ C-H
H-C \   / C-H
      C
      |
      H
```

Man möge sich wohl vergegenwärtigen, daß die Vorstellung der Wertigkeiten und der darauf beruhende Aufbau der Strukturformeln etwas rein Hypothetisches ist, das uns nur in ganz schematischem Sinn etwas über den Aufbau der Moleküle sagt, während alles dafür spricht, daß der wahre Aufbau nichts von dieser Starrheit haben kann, die in solchen Formeln liegt. Wir haben fast auf jeder Seite dieses Werkes neue Beweisstücke für die Überzeugung gefunden, daß die Moleküle kleinste Weltsysteme sind, in denen die Atome sich gewissermaßen als Planeten bewegen. Sie können also nicht mit ein, zwei, drei oder vier „Stangen" aneinander gebunden sein, und namentlich können auch alle diese Verbindungen nicht in einer Ebene liegen, nur zweidimensional sein, da der Natur ja der ganze freie Raum zur Verfügung steht. Dennoch geben diese Strukturformeln uns sicher ein, wenn auch nur ganz äußerliches Bild einer zweifellos vorhandenen Gesetzmäßigkeit, so daß wir diese Form in Ermangelung von etwas Besserem einstweilen festhalten und weiter ausbilden müssen. Wenn uns auch hier wieder eine Parallele zwischen der Entwickelung der astronomischen und der chemischen Erkenntnisse zu ziehen erlaubt ist, so vergleichen wir den gegenwärtigen Stand der chemischen Forschung etwa mit dem der astronomischen zu Zeiten Kepplers, der die offenbare

Harmonie in den Entfernungen der Planeten zunächst in die Form der regulären geometrischen Körper brachte, die er zwischen die Planetenbahnen legte. Diese geometrischen Körper konnten mit dem wahren Bau des Planetensystems in keiner direkten Beziehung stehen, aber sie haben untereinander Gesetzmäßigkeiten, die mit den später von Keppler selbst gefundenen wahren Gesetzen der Planetenabstände gewisse Ähnlichkeiten besaßen, so daß Keppler auf diesem zwar ganz falschen Wege doch am schnellsten zu der Erkenntnis der Wahrheit gelangte. Die heutigen chemischen Formeln sind nur Notbehelfe, die wir auf dem Wege zur Erforschung der wahren Konstitution der Moleküle nicht entbehren können, weil wir die bereits gefundenen Gesetzmäßigkeiten zum Zusammenhalten der großen Fülle von vorliegenden Tatsachen in irgend eine Form kleiden müssen. Wir kommen auf diese Fragen zurück.



Friedrich Wöhler. Nach Werckmeister, „Das 19. Jahrhundert in Bildnissen“. Vgl. Text, S. 487.

Unser angenommener Benzolring bildet den Ausgangspunkt für alle aromatischen Verbindungen. Man nennt deshalb diesen Teil der Chemie auch den der *ringförmigen Atomgruppen*, und dies ist auch die grundlegende Unterscheidung zwischen den beiden Hauptgruppen von organischen Verbindungen, die man nur aus alter Gewohnheit noch die der Fettkörper und die der aromatischen Körper nennt. Bezeichnen wir die einen als die Körper mit *Atomreihen*, die anderen als *Atomringe*, so haben wir nun eine feste und *unzweifelhafte Unterscheidung* gefunden, die uns den besten Einblick in diese Verhältnisse verschafft.

Da es uns in den gegenwärtigen Betrachtungen nur darauf ankommt, die verschiedenen Arten von Gesetzmäßigkeiten in den Gruppierungen der kleinsten Materieteile kennen zu lernen, können wir uns bei der Anführung der dieser Gruppe angehörenden Verbindungen kürzer fassen, obgleich ihre Zahl eine noch viel größere ist als die der Methanderivate; denn wir finden bei *diesen Benzolderivaten dieselben Formen von Gruppen* wieder wie bei jenen. Es gibt also *Benzolkohlenwasserstoffe*, *Benzolalkohole*, *Benzolsäuren*, *Benzoläther* und -ester, *Benzolaldehyde* u. s. w.

a) Kohlenwasserstoffe.

Die Kohlenwasserstoffe lassen sich in die oben bereits angegebenen Reihen C_nH_{2n-6} u. s. w. einordnen. Die erste Reihe ist die des Benzols selbst. Von ihren Homologen nennen wir Benzol, C_6H_6, Toluol, C_7H_8, Xylol, C_8H_{10}. Die Formel des Toluols entsteht, indem man ein H vom Benzolring durch die Methylgruppe CH_3 ersetzt. Wo man diese anhängt, ist gleichgültig, weil sie in dem Ring an jeder Stelle eine gleiche Gruppenveränderung hervorbringt. Die Sache steht aber anders beim Xylol, in welchem zwei H-Atome durch zwei Methylgruppen zu ersetzen sind. Dies können wir auf drei verschiedene Weisen erreichen und erhalten drei verschieden aussehende Formeln:

Ortho-,	Meta-,	Paraxylol oder Dimethylbenzol.
$C-CH_3$ / $H-C$ $C-CH_3$ / $H-C$ $C-H$ / $C-H$	$C-CH_3$ / $H-C$ $C-H$ / $H-C$ $C-CH_3$ / $C-H$	$C-CH_3$ / $H-C$ $C-H$ / $H-C$ $C-H$ / $C-CH_3$

Wir haben hier wieder drei Isomere vor uns, die man bei den Benzolen durch die vorgesetzten Bezeichnungen Ortho-, Meta- und Para- je nach der Stellung der angehängten Gruppen zueinander unterscheidet. Als Abkürzungen wendet man die kleinen Buchstaben o, m und p vor dem betreffenden Namen der Verbindung an. Andere Kombinationen sind nicht möglich, weil in dem Ringe rechts und links ohne Wirkung auf die entstehende Asymmetrie vertauscht werden kann. Ob die eine oder die andere Stellung in einem gegebenen Falle vorliegt, läßt sich durch die Art des Aufbauens der betreffenden Verbindung nachweisen. Wie dies geschieht, kann hier indes nicht erläutert werden.

Benzol ist dem bekannten Benzin nicht unähnlich. Es ist eine wasserhelle, stark riechende Flüssigkeit, die bei etwa 80° siedet und eine helle Flamme beim Verbrennen gibt, die freilich bei gewöhnlicher Luftzuführung stark rußt, weil das Benzol zu kohlenstoffreich ist.

Ganz ebenso, wie wir es bisher bei den Fettkörpern wahrnahmen, steigen die höheren Homologen der Benzolreihen zu immer höheren Siedepunkten auf; das Toluol siedet erst bei 111°. Dieses sowie das Xylol sind sonst dem Benzol sehr ähnlich und werden alle drei, wie ja fast alle Kohlenwasserstoffe, aus dem Steinkohlenteer gewonnen.

Eine andere Reihe von ringförmigen Kohlenwasserstoffen hat die allgemeine Formel C_nH_{2n-12}. Ihr erstes bekanntes Glied ist $C_{10}H_8$, das Naphthalin, dessen Aussehen und Anwendung, z. B. als Mottenvertilgungsmittel, wohl bekannt sind. Es verrät seine Herkunft vom Teer schon durch seinen Geruch und ist bereits ein fester Körper, der aber schon bei 79° flüssig und bei 218° luftförmig wird.

Um die Formeln dieser und der weiter zu behandelnden Verbindungen etwas bequemer und zugleich auch übersichtlicher zu machen, führen wir folgende Vereinfachungen ein. Wir zeichnen nur den Ring, ohne seine doppelten Bindungen und ohne die C an seinen Ecken hinzuzufügen, die niemals fehlen, solange keine Stickstoffatome an seine Stelle treten. An den Ring werden also nur die sich für die H-Atome einschiebenden Gruppen CH_3, CH_2 und CH gehängt. Die Strukturformeln für die bisher erwähnten Stoffe erhalten demnach folgende Gestalt:

Benzol	Toluol	Ortho-,	Meta-,	Paraxylol.
⬡	CH_3 ⬡	CH_3 ⬡ CH_3	CH_3 ⬡ CH_3	CH_3 ⬡ CH_3

Beim **Naphthalin** treten zwei Benzolringe aneinander, wie die erste der folgenden Formeln zeigt:

C C C C C C
C-C
Naphthalin Diphenyl Anthrazen.

Die C bedeuten hier, daß an den betreffenden Stellen sich nur Kohlenstoffatome befinden, während ja an den nicht mit dem anderen Ringe zusammenstoßenden Ecken überall noch H-Atome an C gebunden sind. Die C-Atome sind an den zusammenstoßenden Ecken doppelt gebunden.

Für die nächste Reihe der ringförmigen Kohlenwasserstoffe mit der allgemeinen Formel C_nH_{2n-14}, **Diphenyl**, entsteht die gleichfalls oben aufgezeichnete Struktur. Zwei Benzolringe sind so aneinandergetreten, daß für ein H ein ganzer Ring, wieder mit einem fehlenden H, an die Stelle tritt. Der Unterschied in der Zusammenfügung der beiden Benzolringe beim Naphthalin und beim Diphenyl ist der, daß beim ersteren acht, beim zweiten zehn Ecken in den aneinander tretenden Ringen mit H-Atomen besetzt sind, während die Zahl der C die gleiche bleibt.

Beim **Anthrazen** treten drei Ringgruppen aneinander. Hier aber muß man zu dem weiteren Kunstgriff seine Zuflucht nehmen, daß man beim mittleren Ringe zwei Ecken noch einmal quer hindurch bindet, wie es in der obigen Strukturformel angedeutet ist. Das Anthrazen gehört als erstes Glied einer Reihe von der Form C_nH_{2n-18} an. Es ist ein fester, erst bei 213° schmelzender Körper, der, an sich farblos, lebhaft violett fluoresziert und gleichfalls aus dem Teer gewonnen wird.

Zwei weitere Formen von Ringbindungen können auf folgende Weise entstehen:

H
C-C-C
H
Diphenylmethan $C_6H_5-CH_2-C_6H_5$ Phenanthren $C_6H_4-CH=CH-C_6H_4$.

b) Phenole, Benzylalkohole und Benzylaldehyde.

Bei den **Phenolen** treten ein oder mehrere **Hydroxylgruppen**, OH, in den Ringen **an die Stelle von H-Atomen**. Diese Gruppe war charakteristisch für die Alkohole der Fettreihen. Man würde diese Körper also Benzylalkohole nennen müssen, wenn es sich nicht herausstellte, daß die Benzolkörper mit dieser Hydroxylgruppe in **zwei**, ihrem Verhalten nach sehr verschiedene **Klassen** zu teilen sind, von denen die erste, die der **Phenole, diese Gruppe OH immer direkt am Ring**, die zweite, die eigentlichen **Benzylalkohole**, sie immer nur in **einer Reihe haben, die sich an den Kern gliedert.**

Phenol, der erste Körper der Reihe, hat die Formel ⬡-OH und ist die sehr bekannte **Karbolsäure**, C_6H_6O. Schon aus dieser Nebenbezeichnung als Säure sehen wir, daß das Phenol saure Eigenschaften hat, die die Alkohole nicht zeigen. Die Säuren können mit Alkalien Salze bilden, und dies gilt auch für die Phenole, obgleich ihnen die charakteristische Gruppe der organischen Säuren, COOH, abgeht. Die Phenole nehmen deshalb in der Reihe der Kohlenstoffverbindungen eine ganz besondere Stellung ein.

Auch das nächste Phenol, **Kresol**, C_7H_8O oder CH_3-⬡-OH, hat desinfizierende Eigenschaften und wird vielfach entsprechend angewendet. Es gibt, je nach der Art, wie die beiden an dem Ring hängenden Gruppen verteilt sind, Orthokresol, Metakresol und Parakresol, die

alle drei verschiedene Eigenschaften haben. Das erste, bei dem also die beiden Gruppen benachbart stehen, ist das bekannte Desinfektionsmittel.

Durch Hinzufügung von noch einer CH_2=Gruppe kommen wir zum Xylenol, $C_8H_{10}O$ oder CH_3–CH_2–⬡–OH.

Da es uns hier nur auf die Darstellung des Prinzips der Aneinandergliederung ankommt, gehen wir nicht bis zu den Körpern mit mehrfacher Hydroxylgruppe weiter.

Den Übergang von den Alkoholen zu den Säuren bilden, wie wir sahen, die Aldehyde, die durch die Gruppe COH charakterisiert sind. Hängen wir eine solche Gruppe an einen Benzolkern, also ⬡–COH oder C_7H_6O, so entsteht Benzaldehyd oder das Bittermandelöl, das wir erhalten, wenn wir auf Benzylalkohol ein O-Atom wirken lassen, also durch Oxydation. Dieses O verbindet sich mit 2H aus der Kette –CH_2–OH des Alkohols und läßt das übrigbleibende C sich mit der Hydroxylgruppe zur Aldehydgruppe vereinigen.

c) Aromatische Säuren.

Wir werden nun auch keine Schwierigkeit haben, die Formeln der Säuren mit Benzolkernen aufzustellen, denn wir wissen ja von den Fettkörpern her, daß die für Säuren charakteristische Gruppe COOH ist. Es brauchen nur diese einzeln oder wiederholt an einen oder mehrere Benzolkerne gehängt und beliebig viele CH_2=Gruppen eingeschoben zu werden, um eine theoretisch unbegrenzte Zahl von aromatischen Säuren zu bilden, deren Reihenformeln leicht aufzustellen sind, und von denen auch wirklich eine sehr große Zahl dargestellt worden ist.

Die erste derselben, die Benzoesäure, $C_7H_6O_2$ oder ⬡–COOH, entsteht durch Hinzufügung von einem O zu dem soeben erwähnten Benzaldehyd, d. h. durch seine Oxydation. Diese Säure wurde früher aus dem Benzoeharz gewonnen, dem sie ihren Namen verdankt, heute aber erhält man auch sie mit so vielen anderen interessanten Stoffen aus dem Teer.

Als schon etwas komplizierteres Beispiel nennen wir die in den Galläpfeln vorkommende Gallussäure, $C_7H_6O_5$ oder

OH–C—C–H
OH–C⟨ ⟩C–COOH
OH–C=C–H

Ihr ähnlich ist das Tannin, Digallussäure, die aus zwei Teilen Gallussäure unter Entziehung eines Moleküls H_2O entsteht, demnach die Zusammensetzung $C_{14}H_{10}O_9$ hat. Tannin ist der eigentliche Gerbstoff, der in Verbindung mit Eisen ein Salz bildet, das wir als Tinte kennen.

d) Ätherische Öle.

Da wir Benzylalkohole und Benzolsäuren kennen, so müssen wir auch Äther und Ester aus ihnen zusammensetzen können. Aber der Aufbau wird immer verwickelter, so daß man wohl vermuten, aber nicht immer genau angeben kann, welcher von diesen Klassen von Körpern in chemischer Hinsicht ein in der Natur vorgefundener Stoff angehört. Einige dieser Stoffe seien hier genannt:

Das Terpentinöl besteht im wesentlichen aus dem Kohlenwasserstoff $C_{10}H_{16}$ und wird aus dem Saft der Nadelhölzer gewonnen. Ihm verwandt sind die meisten Harze, der Kanadabalsam, Dammar, Bernstein, Kautschuk u. s. w., die je nach ihrem Gehalt an ätherischen Ölen, in denen sie sich lösen, flüssig, weich oder hart sind.

Die ätherischen oder flüchtigen Öle unterscheiden sich von den bereits erwähnten fetten dadurch, daß sie sich vollkommen verflüchtigen können und keine „Fettflecke“ zurücklassen. Die Wohlgerüche der Blumen und vieler Früchte gehören zu diesen Stoffen, die sich

leicht in Alkohol auflösen und in dieser Form einerseits zur Fabrikation von aromatischen Likören, anderseits von Parfüms dienen. Zu ihnen gehören das Anisöl, Zitronenöl, Kümmelöl, Nelkenöl, Orangenblütenöl, Pfefferminzöl und Rosenöl. Einzelne dieser Substanzen sind bereits auf künstlichem Wege, also ohne Benutzung der betreffenden Pflanze, welche das Öl direkt liefert, hergestellt worden. Wie verwickelt aber deren Moleküle werden, möge aus dem nebenstehenden chemischen Bilde des lieblichen Veilchenduftes hervorgehen, der zu den künstlich nachgebildeten gehört:

Veilchenaroma $C_{13}H_{20}O$.

Wir sehen, wie sehr geschraubt die Zusammenfügungen erscheinen und wie unsymmetrisch die Atome gelagert sind. Angesichts der wunderbaren Ordnung und Ausgeglichenheit, die wir sonst überall in der Natur wahrnehmen, geht eine solche Anordnung uns sozusagen „wider die Natur“; wir können uns nicht vorstellen, daß sie ein Abbild der Wirklichkeit geben sollte. Hätten die Chemiker nicht vorderhand noch unwiderlegliche Gründe gegen jene dreifachen Bindungen, welche den Benzolring unnötig machen, so könnten wir eine außerordentlich elegante und symmetrische Formel selbst für diesen nach den üblichen Begriffen so komplizierten Stoff finden, die lauten würde:

```
    H H H H     H     H H H H
    | | | |     |     | | | |
OH-C-C-C-C-C≡C-C-C≡C-C-C-C-C-H
    | | | |     |     | | | |
    H H H H     H     H H H H
```

Wir haben hier gleichsam einen Zentralkörper vor uns, der von zwei fast genau gleichschweren Planetensystemen, die an ihn dreifach gebunden sind, umkreist wird, die ihrerseits Monde, die H-Körper u. s. w. mit sich führen. Es ist abzuwarten, ob solche oder ähnliche Formeln, die aus allgemeinen Anschauungen über die Gesetzmäßigkeiten in der Natur die Wahrscheinlichkeit für sich haben, nicht doch noch einmal durch die speziellen Untersuchungen eine Bestätigung finden, die ihnen heute noch mangelt. Das Aufsuchen möglichst harmonischer, symmetrischer Verhältnisse, die in der pythagoreischen Harmonie der Sphären sich zuerst betätigte, ist kein bloßes Spiel der Phantasie, denn es geht der Auffindung der wahren Gesetze notwendig voraus.

Es mag hier noch interessieren, daß das Veilchenöl durch Entziehung von 3C zu dem von ihm so sehr verschieden riechenden Menthol, dem Hauptbestandteil des Pfefferminzöls, wird, dessen Formel also $C_{10}H_{20}O$ ist.

e) Stickstoffverbindungen mit Benzolkernen.

An Stelle der verschiedenen Sauerstoff enthaltenden Gruppen können auch Stickstoffgruppen die H-Atome an den Ringen ersetzen. Eine solche einwertige Stickstoffgruppe ist z. B. unter Annahme des dreiwertigen Stickstoffs $-NH_2$. An unsern Ring gebracht, bildet sie ⬭$-NH_2$; das ist das Amidobenzol oder Anilin, jener auch im gewöhnlichen Leben schon bekannt gewordene Stoff, der chemisch das größte Interesse bietet. Auch er wird aus dem unscheinbaren Teer hergestellt, der die ganze Welt der chemischen Verbindungen aus der lebendigen Natur jener Vorzeitperiode zu uns herübergenommen zu haben scheint. Aus dem Anilin können wir geradezu alle Farbenschattierungen herstellen, die die Natur zu schaffen vermag. In der

heutigen Massenfabrikation hat man jedoch andere Wege gefunden, die sogenannten Anilinfarbstoffe zu erzeugen, Salze, die aus der Verbindung des Anilins oder verwandter Stoffe mit Säuren hervorgehen. Nehmen wir zwei Anilinringen je ein H=Atom, so stellen sie einwertige Gruppen dar, die sich untereinander verbinden können. So entsteht NH_2-⬡-⬡-NH_2 oder das Doppelanilin, $C_{12}H_{12}N_2$, von dem sich wieder eine ganze Reihe anderer Verbindungen ableiten.

f) Verbindungen mit Stickstoff, Sauerstoff u. s. w. im Kern.

Bis jetzt sind die Verbindungen der sechs Kohlenstoffatome in unserem Benzolring immer unangetastet geblieben. Es gibt aber auch Stoffe, deren Zusammensetzung wir uns nicht anders vorstellen können, als daß andere als C=Atome in den Ring treten, wodurch dann auch seine inneren Bindungen andere werden. Tritt N an die Stelle von C, so bleiben die Bindungen nach den benachbarten C=Atomen im Ringe nur einfach, und für das N=Atom ist noch eine Valenz übrig, wie es auch mit dem C im Ringe der Fall war. Es kann aber auch Sauerstoff oder Schwefel an diese Stelle treten; da diese Elemente nur zweiwertig sind, so ist es unmöglich, an sie, wenn sie im Ringe stehen, noch andere Atome zu hängen. In den letzteren beiden Fällen wird aus dem Sechseck ein Fünfeck, weil auch hier zwei C=Atompaare sich zweifach binden müssen, so daß keine Valenz mehr übrigbleibt, an welche sich ein fünftes C hängen könnte. Die folgenden Figuren veranschaulichen diese drei Klassen von Körpern:

```
H-C-C-H          H-C-C-H          H-C-C-H
  ‖ ‖              ‖ ‖              ‖ ‖
H-C C-H          H-C C-H          H-C C-H
  \ /              \ /              \ /
  N-H               O                S
 Pyrrol          Furfuran         Thiophen.
```

Auch diese drei Stoffe kommen im Teer vor. Pyrrol ist in seinem Verhalten mit Chloroform zu vergleichen, und Thiophen ist dem Benzol sehr ähnlich, obgleich es doch ein ganz anderes Element, den Schwefel, enthält, während Benzol bekanntlich ein reiner Kohlenwasserstoff ist. Alle drei sind farblose Flüssigkeiten. Furfuran siedet schon bei 32°, Thiophen bei 84° (Benzol bei 81°) und Pyrrol bei 131°.

Ferner können auch folgende andere Gruppierungen stattfinden:

```
     C-H                      C-H              C-H   C-H             N-CH3
H-C      C        C-H    H-C      C-H     H-C              C-H    CH3-C      N-⬡
H-C               C-H    H-C      C-H     H-C              C-H    H-C        C=O
     C-H   N-H                 N               N     C-H
```

Indol C_8H_7N — Pyridin C_5H_5N — Chinolin C_9H_7N — Antipyrin $C_{11}H_{12}N_2O$.

Beim ersten, dem Indol, sehen wir, daß ein Pyrrolring mit einem Benzolring zusammengetreten ist. Der Stoff ist übelriechend und findet sich in den Fäulnisprodukten des Eiweißes, ein Abkömmling desselben auch in den menschlichen Exkrementen. Beim Pyridin ist ein N an einen sonst vollständig gebliebenen, also sechseckigen Benzolring getreten, wodurch diesem N nun kein anderes Atom mehr angehängt werden kann, da der Stickstoff hier immer nur dreiwertig auftritt. Pyridin hat gleichfalls keinen angenehmen Geruch und ist der Stoff, welcher dem Spiritus beigemengt wird, um ihn ungenießbar zu machen, so daß er nur als Brennspiritus (denaturierter Spiritus) verwendet werden kann. Beim Chinolin ist ein Pyridinkern

an einen Benzolkern getreten. Chinolin ist dem Chinin ähnlich, jenem fieberheilenden Stoffe, den man aus der Chinarinde gewinnt, dessen genauen Aufbau man indes noch nicht kennt. Man hat es aber mit Erfolg versucht, aus dem Chinolin Stoffe aufzubauen, welche die gleiche Eigenschaft als Antifebrine besitzen. Unter diesen ist das Antipyrin am bekanntesten geworden, dessen schon ziemlich verwickelte Formel wir hier mit aufführten. An ein in einem Kern befindliches N mit seiner übrigbleibenden Valenz ist hier noch ein ganzer Benzolkern angehängt.

Auf diese Weise können noch viele andere Verkettungen von Kernen mit angehängten Seitenketten hergestellt werden, aber die obigen Beispiele mögen genügen.

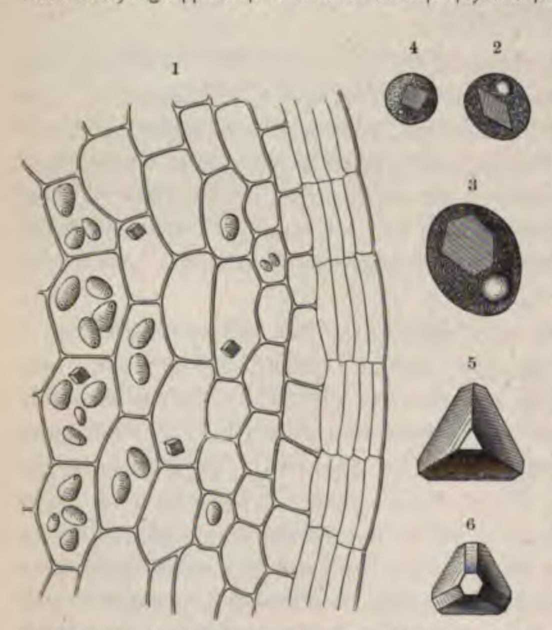
g) Alkaloide.

Es ist nun noch eine Reihe von Körpern zu besprechen, deren Zusammensetzung man zwar kennt, über deren molekularen Aufbau man aber vielfach noch nicht im klaren ist. Sie haben chemisch einen ausgesprochenen Charakter als Basen, bilden also mit Säuren Salze, wie Kali, Natron, Kalk; nur sind sie schwächer als diese mineralischen Basen, können demnach von ihnen aus ihren Verbindungen getrieben und dadurch gewonnen werden. Daher rührt ihr Name Alkaloide. Auf den menschlichen Organismus haben sie meist eine sehr kräftige Wirkung, entweder als starke Gifte oder als scharfe Gewürze oder endlich als Arzneimittel. Wir wollen nur einige derselben hier anführen:

Das Theobromin, $C_7H_8N_4O_2$, gibt den Kakaobohnen ihren bitteren Geschmack, das Kaffein, $C_8H_{10}N_4O_2$, ist in den Kaffeebohnen und auch im Tee jene nervenanregende, aber bei zu großen Dosen giftig wirkende Substanz der bekannten Getränke. Dieser Kaffee- oder Tee-Extrakt, wie wir den Stoff nennen dürfen, unterscheidet sich von dem des Kakao nur durch Hinzufügung einer CH_2-Gruppe. Das bekannte Fiebermittel Chinin, $C_{20}H_{24}N_2O_2$, und das berüchtigte, äußerst starke Gift Strychnin, $C_{21}H_{22}N_2O_2$, welches in den Augen der Krähe vorkommt und die „zerstoßenen Krähenaugen" zu einem Geheimmittel der mittelalterlichen „Hexenküchen" machte, gehören zur gleichen Gruppe. Die Zusammensetzung des Strychnins unterscheidet sich von der des heilsamen Chinins nur durch Hinzufügung von einem C und Wegnahme von zwei H. Ferner gehören dazu das Piperin, $C_{17}H_{19}NO_3$, Morphin, $C_{17}H_{19}NO_3 + H_2O$, Atropin, $C_{17}H_{23}NO_3$, und Kokain, $C_{17}H_{21}NO_4$. Hier haben wir vier ganz verschieden wirkende Stoffe vor uns, deren chemische Zusammensetzung prozentualisch aber wieder sehr ähnlich ist. Alle enthalten 17 Atome Kohlenstoff und drei von ihnen noch dazu die ständige Gruppe NO_3. Das Piperin, der Geist des Pfeffers, unterscheidet sich chemisch von dem Morphin, dem bekannten, aus dem Mohnsaft gewonnenen Schlafmittel, das in zu großen Dosen auch tödlich wirkt, überhaupt nur durch die Hinzufügung von einem Molekül Wasser, das mit ihm chemisch verbunden ist. Das Atropin, gleichfalls ein starkes, aus der Tollkirsche gewonnenes Gift, wird zu Morphin oder Piperin durch Wegnahme von vier H. Es ist bekannt, daß das Atropin, in sehr geringen Mengen genommen, auf die Pupille des Auges erweiternd wirkt. Tauscht man beim Atropin zwei H gegen ein O aus, so entsteht das Kokain, das seinen Namen von seinem Vorkommen in der Kokapflanze hat. Wir kennen das Kokain als ein Mittel, das schmerzstillend auf die Nerven wirkt. Koniin, $C_8H_{17}N$, und Nikotin, $C_{10}H_{14}N_2$, enthalten keinen Sauerstoff. Auch sie sind beide starke Gifte, Koniin das Schierlingsgift, Nikotin ein Bestandteil des Tabaks. Gewisse Tabaksorten enthalten davon bis zu 8 Prozent, der Havannatabak aber am wenigsten, etwa nur 2 Prozent. Außerdem gehört zu den Alkaloiden das sogenannte Leichengift, Ptomain, daß sich bei der Fäulnis von Kadavern bildet.

h) Eiweißkörper.

Endlich gelangen wir zu der höchsten Klasse von chemischen Verbindungen, denen wir in der Natur begegnen, und die in ihr die allerwichtigste Rolle spielen, zu den Eiweißkörpern. Nicht einmal die Zusammensetzung nach dem bloßen Atomgehalt dieses Stoffes ist aufgeklärt, wieviel weniger der eigentliche Aufbau eines solchen Eiweißmoleküls, das jedenfalls aus mehreren hundert Atomen besteht. Eine der hypothetischen Formeln, welche für dasselbe vor einiger Zeit aufgestellt worden war, ist z. B. $C_{72}H_{112}N_{18}O_{22}S$. Neuere Forschungen, über welche Hoffmeister in der Naturforscherversammlung zu Karlsbad 1902 berichtete, haben indes ergeben, daß ähnliche Formeln nur die Kerne darstellen, deren sich im fertigen Eiweißmolekül hundert und mehr in der verschiedensten Weise aneinanderreihen, so daß sich seine Molekulargröße wahrscheinlich zu 16—17,000 herausstellt, bei $H = 1$. Mit über hundert Elementen, die sie im großen und ganzen intakt läßt, den Kernen, kombiniert die Natur das Mosaikbild der Eiweiß enthaltenden organischen Formen und Maschinen, und es ist wohl möglich, daß jede besondere Tierform ihr eigenes Eiweißmolekül hat, durch das es sich als Spezies unterscheidet und weiter vererbt. Die Erhaltung der Arten wäre also im wesentlichen eine chemische Erscheinung. Eine so verwickelte Zusammensetzung muß man annehmen, weil man aus dem Eiweiß durch verschiedenartige Behandlung eine sehr große Reihe von anderen zusammengesetzten Stoffen, die wir vorhin behandelt haben, abzuleiten vermag. Es scheint, daß Eiweiß schließlich auch alle anderen Stoffe, die in der lebendigen Natur vorkommen, enthält, oder daß sie aus ihm herauszubilden sind.



Kristalloide. 1. Kristalloide und Stärkekörner in den Zellen der Kartoffelknolle; 2 bis 4. Aleuronkörner mit Kristalloiden und Globoiden; 5 und 6. Kristalloide aus dem Ricinussamen, stark vergrößert. Nach Kerner, „Pflanzenleben“. Vgl. Text, S. 496 u. 497.

Die Rolle, welche die Kohlehydrate, in erster Linie also die Stärke, in der Pflanzenwelt spielen, übernimmt in der Tierwelt das Eiweiß. Während der größte Teil des Pflanzenleibes aus Stärke und seinen Abkömmlingen besteht, ist der Tierkörper hauptsächlich aus Eiweiß zusammengesetzt, besonders im Fleisch, das nach Entfernung seines Wasser- und Fettgehaltes nur Eiweißkörper enthält. Aber in geringen Mengen kommt Eiweiß auch in Pflanzen, namentlich ihren Samen, vor. In den Pflanzenzellen bemerkt man oft neben den Stärkekörnern kristallartige Körper, die aber weich, elastisch geblieben sind und Eiweißsubstanz enthalten. Man nennt diese interessanten Gebilde, die verschiedene Formen annehmen, Kristalloide (s. die obenstehende Abbildung).

Wie schon die verhältnismäßig einfach zusammengesetzte Stärke in sehr verschiedenen Formen vorkommt, so ist dies noch in weit höherem Maße mit dem Eiweiß der Fall.

Das eigentliche Eiweiß, wie wir es aus den Hühnereiern kennen, nennen wir Albumin. Wir wissen, daß sich dieses in kaltem Wasser wohl leicht löst, aber in heißem Wasser gerinnt, so daß es dann unlöslich wird und ausscheidet. Als Fibrin oder Faserstoff bildet das Eiweiß einen Hauptbestandteil der tierischen Gewebe, insbesondere der Muskeln. In dieser Form ist es nur flüssig bei Blutwärme, erstarrt aber bei niederen Temperaturen, weshalb unsere Glieder bei Frost und der Todesstarre steif werden. Kasein oder Käsestoff ist das in der Milch enthaltene Eiweiß, das sich bei bekannter Behandlung abscheidet. Globuline nennt man jene in den Pflanzenzellen auftretenden Eiweißkörper, die namentlich auch in den Hülsenfrüchten, den Bohnen, Erbsen u. s. w., gefunden werden. Dazu gehören die kleinen Aleuron- oder Proteinkörner, die besonders in den Zellen ölreicher Samen auftreten und neben Kristalloiden runde Globoide von ähnlicher Zusammensetzung einschließen (s. die Abbildung S. 496, Nr. 2—4). Auch im Eigelb sind sie enthalten. Das Ptyalin im Mundspeichel, das Pepsin im Magen, die anderen Schleimabsonderungen, der Leim der Knochen, die Hornsubstanz der Hörner, Fingernägel, Haare u. s. w., sind gleichfalls Eiweißkörper. Das Blut besteht zum größten Teil aus Eiweiß in der Form von Albumin und Fibrin, das Protoplasma ist lebendes Eiweiß ohne alle Organe oder enthält doch diesen Stoff zum größten Teil, während seine eigentliche chemische Beschaffenheit noch weniger aufgeklärt ist als die des Eiweiß selbst.

i) Rückblick.

Überblicken wir nun noch einmal alle die Arten von Verkettungen, in denen die wenigen chemischen Elemente zusammentreten, die die gesamte lebende Natur aufbauen.

Wir sehen zunächst, daß die große Reihe von Stoffen, die wir im vorangehenden erwähnten, und die nur einen kleinen Teil der auf den bezeichneten Wegen zu erhaltenden Stoffe bilden, nur aus den vier Organogenen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff zusammengesetzt ist, mit noch wenigen anderen Elementen, die immer nur in ganz geringen Mengen auftreten. Wir benutzten von ihnen sogar nur noch Chlor und Schwefel in einigen wenigen Fällen. Allerdings treten in den organischen Verbindungen noch eine Anzahl anderer Elemente auf, so namentlich Phosphor als phosphorsaurer Kalk in den Knochen und auch in der Eiweißsubstanz des Gehirns, im Harn und in verschiedenen Pflanzenteilen, ferner Eisen, Kali, Natron, Silicium u. s. w. Aber alle diese Stoffe sind stets nur als Anhängsel der Hauptgruppen zu betrachten, die wir kennen lernten, wie wichtig sie auch zuweilen im Haushalt der Natur sein mögen. Jene Hauptgruppierungen allein bringen das vielseitige Bild der Erscheinungen in der lebendigen Welt hervor. Wir fassen die charakteristischen Züge dieser Hauptgruppen hier noch einmal zusammen.

Es fiel zunächst auf, daß die Organogene gewisse sehr deutlich hervortretende Gruppierungen bilden, die bei den verschiedenen Andersgruppierungen während der chemischen Operationen meist unverändert zusammenbleiben und dadurch eine bestimmte Klasse von Körpern mit bestimmten chemischen Eigenschaften hervorbringen. Wir nannten diese Gruppen, welche nur Teile derjenigen bilden, die als fertige Stoffe auftreten und deshalb noch eine oder mehrere Valenzen übrigbehalten, um sich an andere Gruppen hängen zu können, Pseudoelemente, denn sie haben in der Tat durch ihre Beständigkeit und den besonderen Charakter, welchen sie durch ihre Anwesenheit in anderen Gruppen dem entstehenden Stoffe geben, viele Ähnlichkeit mit den echten Elementen. Freilich können die Atome dieser Gruppen sich unter Umständen doch trennen, wodurch dann der Stoff seine Eigenschaften entsprechend ändert. Diese Gruppen sind:

$-CH_3$	= Methyl	= Methangruppe
$=CH_2$		= Äthylengruppe
$\equiv CH$	= Propyl	= Acethylengruppe
$-OH$	= Hydroxyl	= Alkoholgruppe
$-COOH$	= Karboxyl	= Säuregruppe
$-COH$		= Aldehydgruppe
$=COO$		= Estergruppe
$-NH_2$		= Amidgruppe
$=NH$		= Imidgruppe
$-C_6H_5$	= Phenyl	= Einwertiger Benzolring

Wir unterscheiden die verschiedenen Arten von organischen Verbindungen in folgender Weise: Alle Körper, die keinen Ring enthalten, sind Fettkörper, alle ringförmigen aromatische.

Alle Körper, die nur CH_3-, CH_2- und CH-Gruppen oder nur Ringe oder beide gemischt enthalten, sind reine Kohlenwasserstoffe, die also nur aus C und H bestehen und deshalb leicht Sauerstoff anziehen, um mit ihm zu verbrennen. Diese Stoffe sind demnach brennbar; freilich um so schwerer, je mehr CH_2-Gruppen sie enthalten, weil diese ihren Siedepunkt stufenweise emporrücken. Die Kohlenwasserstoffe mit wenig Gliedern sind deshalb Gase, die mit mehreren sind Flüssigkeiten und endlich die mit sehr vielen Gliedern feste Körper. Bei den ringförmigen Verbindungen beginnen die Reihen bereits mit den Flüssigkeiten. Die Kohlenwasserstoffe sind Gase, Öle oder wachs- und harzartige Körper. Die Öle der offenen Ketten haben einen fettigen Charakter, die der Ringe einen ätherischen und verflüchtigen sich ohne Rückstand.

Körper, die OH (Hydroxyl) enthalten, sind Alkohole oder, bei Ringen, Phenole; auch die untersten Glieder der Alkoholreihen sind bereits Flüssigkeiten. Die Alkohole sind brennbar, soweit es die Höhe ihres Siedepunktes erlaubt, der ebenso wie in allen anderen organischen Vereinigungen mit der Anzahl der Kettenglieder steigt. Es gibt zwei- und mehrwertige Alkohole, je nachdem die Gruppe OH zwei- oder mehrmal in ihnen vorkommt. Bei den ringförmigen Körpern mit Hydroxylgruppen unterscheidet man zwei Klassen: die eine, bei der das OH unmittelbar am Ring hängt, nennt man Phenole, und nur die, bei denen zwischen Ring und Hydroxyl noch irgend eine oder mehrere andere Gruppen eingeschoben sind, heißen Alkohole, weil sie den kettenförmigen Alkoholen in ihrem Verhalten im wesentlichen gleichen, während die Phenole sich in ihrem Verhalten den Säuren nähern, auch meist desinfizierend wirken (Karbolsäure). Die Alkohole brennen, die Phenole nicht. Bei den ersteren wird also durch die vorhandenen Wasserstoffatome Sauerstoff angezogen und mit der Gruppe vereinigt, während bei den direkt am Ring befindlichen Hydroxylgruppen der Phenole die Wasserstoffatome zu fest sitzen, so daß der Sauerstoff eher abgegeben, d. h. die Oxydation anderer mit ihnen in Verbindung tretender Körper unterstützt wird.

Tritt in einer Kette oder einem Ring die Gruppe COOH (Karboxyl) auf, so ist der betreffende Körper eine organische Säure, d. h. er gibt von seinem Sauerstoffgehalt an andere Körper ab; er unterhält die Verbrennung (Oxydation), ist dagegen selbst unbrennbar. Die Zahl der Säuren, namentlich der aromatischen, ist sehr bedeutend.

Tritt ein mit einer OH-Gruppe behafteter Körper mit einem anderen zusammen, der eine COOH-Gruppe enthält, also ein Alkohol mit einer Säure, so scheidet sich H_2O, Wasser, aus, und es bleibt die Gruppe $-COO-$, die einen Ester charakterisiert. Die Ester haben Eigenschaften der Salze in chemischer Hinsicht, d. h. sie verhalten sich neutral, wogegen sie wegen ihres

verhältnismäßig großen Sauerstoffgehaltes die Verbrennung unterstützen. Insbesondere ist dies der Fall mit den Estern des dreiwertigen Alkohols Glyzerin, den Fetten und fetten Ölen.

Haben wir in einer Formel zwischen den Gruppen ein oder mehrere alleinstehende O, so ist der Stoff ein einfacher Äther. Dieses O tritt sehr leicht mit den in der Verbindung bereits vorhandenen Wasserstoffatomen zu Wasser oder mit dem Kohlenstoff zu Kohlensäure zusammen, woher die leichte Entzündlichkeit der Äther rührt.

Wieder eine besondere Gruppe bilden die Aldehyde mit dem Zeichen COH. Sie stehen zwischen den Alkoholen und den Säuren und zeigen ein lebhaftes Bestreben, aus Stoffen, die mit ihnen in Verbindung gebracht werden, Sauerstoff anzuziehen, um damit Säuren zu bilden. Daher kommt die Eigenschaft der Aldehyde, Mikroorganismen zu zerstören, zu desinfizieren.

Die Gruppe NH_2 charakterisiert die Nitroverbindungen der Amide und kann überall für ein H einer beliebigen Gruppe eintreten. Die Imide führen die zweiwertige Gruppe NH. Diese Verbindungen haben ammoniakalische Eigenschaften, und ihnen sind wichtige Aufgaben im tierischen Organismus zugewiesen.

Außer diesen Gruppen hatten wir noch die der Kohlehydrate als eine der wichtigsten im Haushalte der Natur erkannt. In ihnen treten immer zweimal soviel H wie O auf, aber diese Elemente sind in ihnen nicht zu Wasser verbunden. Es würde deshalb ein falsches Bild geben, wenn wir für diese Verbindungen etwa H_2O als besonderes Symbol gewählt hätten. Die für die Kohlehydrate charakteristische Gruppe ist vielmehr =(CH)–OH. Kohlehydrate kommen in Verbindung mit ringförmigen Gruppen nicht vor.

Zu diesen Stoffen treten nun noch die Alkaloide und die Eiweißkörper als eigentümliche und verwickeltere Verbindungen. Die ersteren haben, wie ihr Name andeutet, alkalische Eigenschaften; das Eiweiß ist dagegen ein kompliziertes Gemisch von Verbindungen aller möglichen Eigenschaften, so daß wir es in eine besondere Kategorie ohne weiteres nicht bringen können.

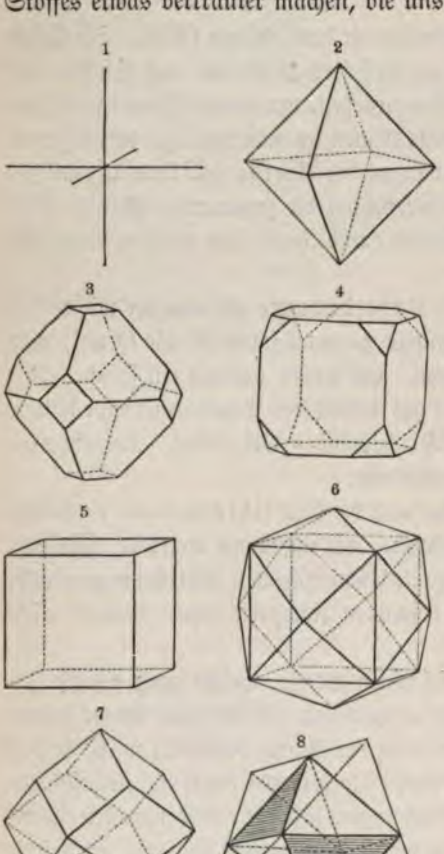
Sehr wichtig war die Erfahrung, daß auch diejenigen Stoffe, welche ganz gleiche Zusammensetzung in Bezug auf die Anzahl der in ihnen enthaltenen gleichartigen Atome haben, ihre Eigenschaften verändern, je nachdem die Gruppierung der Atome verändert wird, so daß also unter allen Umständen nur diese Gruppierung, deren Vorkommen durch die eingeführten Symbole angedeutet wurde, den Charakter der Verbindungen bedingt. Wir nannten solche, aus einer gleichen Anzahl von gleichen Atomen bestehende, aber verschiedenartig gruppierte Verbindungen Isomere. Die eigenartigsten derselben sind die zu Ringen geschlossenen Verbindungen, in denen alle Glieder zwanglos gesättigt sind. An deren Stelle könnte man oft auch Ketten mit dreifach gebundenen Kohlenstoffatomen setzen, die dann aber den Charakter der sogenannten ungesättigten Verbindungen haben und noch die Aufnahme anderer Atome oder Gruppen zu ermöglichen suchen, was bei den ringförmigen Verbindungen nicht der Fall ist.

Mit diesen verhältnismäßig sehr einfachen Mitteln hat die lebendige Natur Tausende von verschiedenen Stoffen geschaffen, denen in ihrem Haushalte die verschiedenartigsten Aufgaben zuerteilt wurden. Wir erkennen auch hieraus, daß selbst im Getriebe der so unendlich vielverzweigten Tätigkeit der organischen Maschinen einheitliche, einfache Gesetze walten müssen, die uns die Zukunft sicher enthüllen wird.

In den folgenden Abschnitten dieses Werkes über Kristallsysteme und die Beziehungen der Chemie zu Wärme, Licht und Elektrizität fassen wir diejenigen Gesetzmäßigkeiten näher ins Auge, welche den chemischen und physikalischen Vorgängen gemeinsam zu Grunde liegen.

4. Die Kristallsysteme.

Ehe wir die in dem ersten Hauptabschnitt beschriebenen physikalischen Erscheinungen der Materie mit den uns gegenwärtig beschäftigenden chemischen Eigenschaften in Beziehung zu bringen versuchen, müssen wir uns zunächst mit einer der wunderbarsten Erscheinungsformen des Stoffes etwas vertrauter machen, die uns in den andern Kapiteln schon vielfach beschäftigt hat, und die bei den chemischen Vorgängen eine überaus wichtige Rolle spielt: der Kristallisation.



Einfache Kristallformen des regulären Systems. 1. Senkrechte Stellung gleicher Achsen des regulären Systems. 2. Oktaeder. 3. An den Ecken abgestumpfter Oktaeder. 4. Übergangsform des Oktaeders zum Würfel. 5. Würfel. 6. Pyramidenwürfel. 7. Rhombendodekaeder. 8. Hemiedrische Entstehung des Tetraeders aus dem Oktaeder. Vgl. Text, S. 501 u. 502.

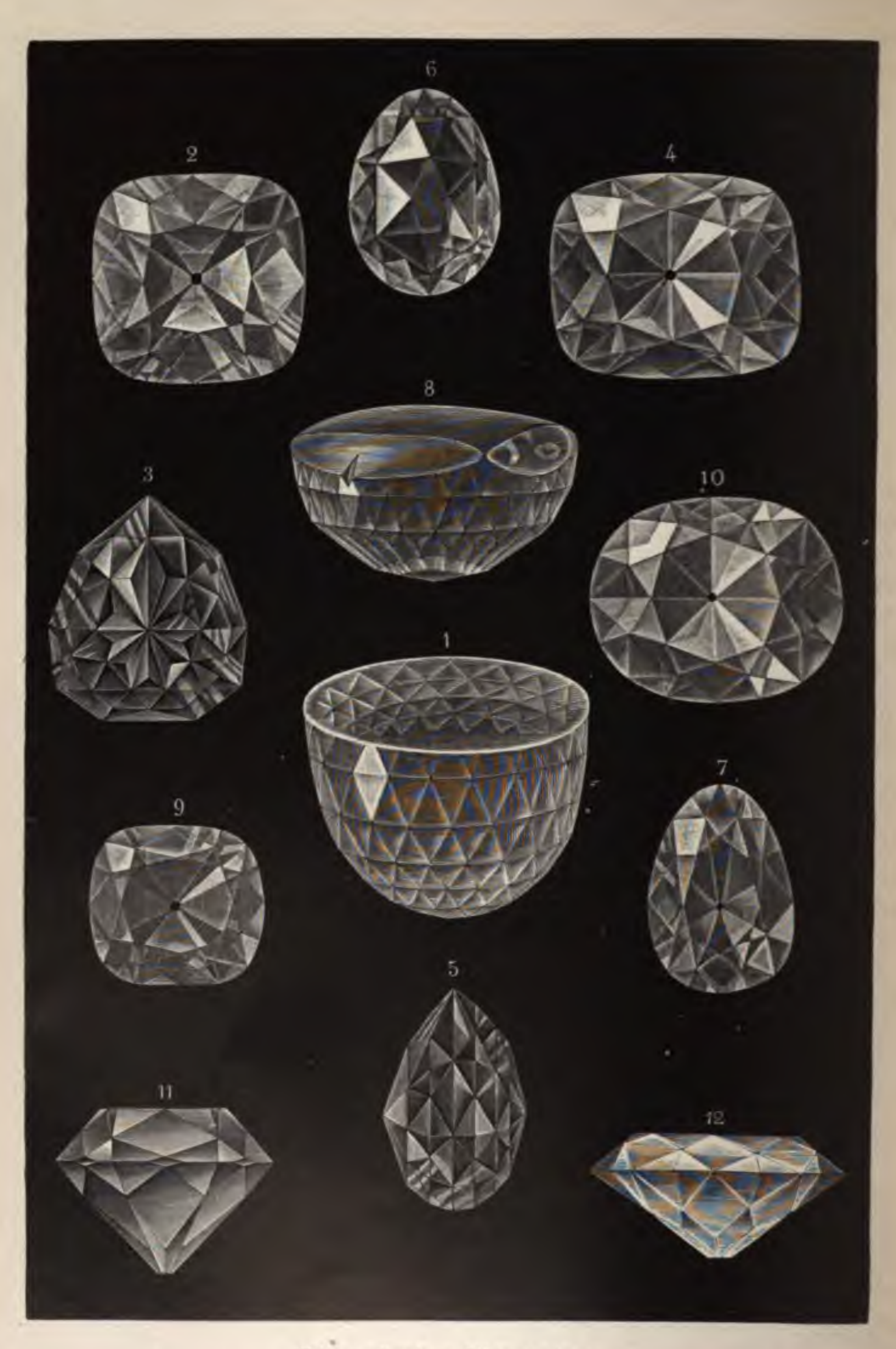
Wir wissen, daß Grundstoffe wie auch chemische Verbindungen unter den verschiedensten Umständen auskristallisieren, d. h. bei dem Übergang aus dem flüssigen oder auch gasförmigen Zustand in den festen ganz bestimmte symmetrische Formen annehmen, die für den gleichen Stoff meist dieselben sind, so daß sie mit dem Wesen ihres atomistischen Aufbaues offenbar im innigsten Zusammenhange stehen und darum für dessen Erkenntnis von großem Werte sind.

Ebenso, wie es zunächst zur Einführung in die chemischen Vorgänge nötig war, einen mehr schematischen Überblick von ihnen zu geben, wollen wir auch die Kristallformen hier nur nach ihren äußeren Merkmalen gruppieren und uns erst an anderer Stelle mehr dem Wesen dieser noch immer recht geheimnisvollen Erscheinung zuwenden.

Wenn man auch einem jeden Kristall sofort ansieht, daß er nach bestimmten Symmetriegesetzen aufgebaut ist, durch welche er den besonderen Reiz seines Anblicks gewährt, so ist es doch zuweilen recht schwer, diese Symmetriegesetze selbst festzustellen, weil die Kristalle selten reine Formen zeigen, sondern meistens aus deren vielfachen Zusammenfügungen bestehen. Die Kristalle sind in mehr als einer Hinsicht als die Blumen des Mineralreiches zu bezeichnen; an beiden bewundern wir die entzückende Symmetrie und die Schönheit ihrer Farben. Beide zeigen zwar mancherlei Abweichungen vom normalen Typus, doch sind bestimmte Grundformen für die Spezies vorhanden, deren allgemeinere Eigenschaften sich wieder zu Familienmerkmalen u. s. w. ordnen lassen. Auch die Kristalle wachsen und verzweigen sich infolge bestimmter Wirkungen der Naturkräfte, die auch die Blüten sprießen lassen.

Schon die optischen Eigenschaften der Kristalle richten sich, wie wir sahen, nach bestimmten, diesen eigenen Symmetrieachsen, ebenso wie ihre magnetischen, elektrischen Eigenschaften, die





Die grössten Diamanten.

1. Grossmogul, 270 Karat. — 2 u. 11. Regent odcr Pitt, im französischen Kronschatz, $136^{3}/_{4}$ K. — 3 u. 5. Florentiner, im Schatz des österreichischen Kaisers, $133^{1}/_{8}$ K. — 4 u. 12. Stern des Südens, aus Brasilien, in Privatbesitz, 125 K. — 6. Sancy, im Besitz des russischen Kaisers, $53^{1}/_{2}$ K. — 7. Grüner Diamant, im Grünen Gewölbe zu Dresden, 40 K. — 8. Kohinur, im englischen Kronschatz, alte Form, 280 K.; 10, neue Form, $106^{1}/_{16}$ K. — 9. Blauer Diamant, von Hope in Amsterdam, $44^{1}/_{4}$ K.

Wärme und Elastizität. Wir müssen annehmen, daß die Entstehung der Kristalle mit diesen Richtungen im engen Zusammenhange steht, und es erscheint darum ratsam, eine Systematik derselben auf dem Verhältnis dieser Achsen zu begründen.

Jeder Kristall hat als Körper drei Dimensionen; folglich muß man an ihm mindestens drei Achsen unterscheiden. Der für unsere Anschauung einfachste Fall ist der, daß diese drei Achsen aufeinander senkrecht stehen und gleich lang sind, wie es auf S. 500, Abbildung 1, dargestellt ist. Die Enden dieser drei Achsen bilden sechs Punkte, die entweder in Ecken, Kanten oder Flächen eines regulären geometrischen Körpers endigen. Offenbar können verschiedene Körper diese Bedingung erfüllen. Zunächst legen wir durch je drei dieser Punkte eine Ebene. Es entsteht dann das von gleichseitigen Dreiecken begrenzte Oktaeder (s. die Abbildung 2, S. 500), mit gleichen Winkeln, Flächen und Kanten. In dieser Form kristallisiert neben dem Magneteisenerz der Kohlenstoff als Diamant aus (s. die Tafel „Edelsteine", S. 434, Fig. 14), doch wird ihm zur Erhöhung der Lichtbrechung ein besonderer Schliff gegeben (s. die beifolgende Tafel „Die größten Diamanten"). Der die ganze organische Welt aufbauende Kohlenstoff drängt sich kristallinisch zu der einfachsten Form zusammen, während er als Graphit eine wesentlich weniger symmetrische Gestalt annimmt. Kohlenstoff ist in jeder Hinsicht als das vielseitigste aller Elemente anzusehen. Die Natur gefällt sich in allen erdenklichen Veränderungen der Gestalt, in denen sie ihre Materie zu festen Systemen vereinigt, vorausgesetzt, daß jene Symmetrieelemente bleiben, die das äußere Merkmal der tiefbegründeten Gesetzmäßigkeiten sind, unter denen dieser Übergang in den festen Zustand stattfindet. Stumpfen wir die sechs Ecken des Oktaeders so ab, daß an ihrer Stelle senkrechte und wagerechte Flächen entstehen, in deren Mitten nun die Achsen endigen, so erhalten wir schon einen Körper mit vierzehn Flächen (s. die Abbildung 3, S. 500), von denen die neu hinzugekommenen sechs Flächen wieder einander gleich geblieben sind, wobei auch das Verhältnis und die Stellung der drei Achsen zueinander sich nicht geändert hat.



Bleiglanzkristalle.

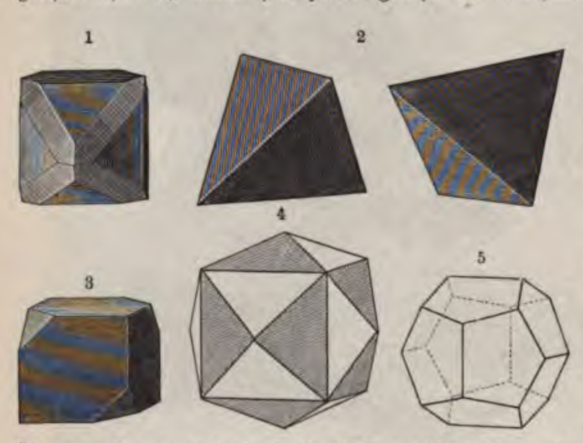
Diese neuen sechs Flächen rücken weiter immer mehr nach dem Durchschnittspunkte der Achsen hin, bis sie sich zu überschneiden beginnen und zu senkrechten und wagerechten, also mit den Achsen parallelen Kanten zusammentreten. Es entsteht zunächst die auf S. 500, Abbildung 4, dargestellte Form, nach welcher z. B. Bleiglanz kristallisiert (s. die obenstehende Abbildung). Die Flächen treten in rechten Winkeln schließlich ganz zusammen, und es bleiben nur sechs Flächen übrig, so daß wir wieder einen in allen Teilen gleichen Körper, den Würfel, Hexaeder (s. die Abbildung 5, S. 500) vor uns haben. In Würfeln kristallisiert das Kochsalz; auch der Flußspat hat diese einfache Form, obwohl das Aneinanderwachsen verschiedener Würfel den wahren kristallinischen Charakter häufig verdeckt.

Setzen wir auf jede Seite des Würfels eine vierseitige Pyramide, von denen dann sechs gleiche vorhanden sind, in deren Spitzen die drei Achsen auslaufen, so haben wir abermals einen ganz regulären Körper, dessen Achsenverhältnisse den genannten Bedingungen genügen, der aber nun schon viermal 6, also 24 untereinander gleiche Flächen hat. Man nennt ihn einen Pyramidenwürfel (s. die Abbildung 6, S. 500).

Auch können wir dem Oktaeder statt der sechs Spitzen die acht Kanten abstumpfen, ohne dadurch an dem Achsenverhältnis etwas zu ändern. Auf diese Weise entsteht der unten, Abbildung 1, dargestellte Körper.

Lassen wir auch diese neuen Flächen wachsen, so entsteht schließlich ein Rhombendodekaeder (s. die Abbildung 7, S. 500), also ein zwölfseitiger Kristall. Er hat seinen Namen daher, daß seine unter sich wieder ganz gleichen Seiten rhombisch begrenzt sind; seine Kanten bilden Parallelogramme.

Noch auf einem anderen Wege hat die Natur die Fülle der möglichen Kristallformen vergrößert: sie ließ immer jede zweite Fläche eines Kristalles wachsen, bis sie sich mit einer anderen, gleichfalls auf diese Weise wachsenden schneidet. Diese Erscheinung nennt man Hemiedrie. Nehmen wir wieder das Oktaeder und erweitern vier seiner nicht mit den Kanten zusammenstoßenden Flächen, wie es in der Figur angedeutet ist, so entsteht eine dreiseitige Pyramide, also mit ihrer Basis ein Vierflächner, Tetraeder (s. die Abbildung 8, S. 500), dessen Seiten vollkommen gleich sind, und dessen Achsenverhältnis immer noch die gestellten Bedingungen erfüllt. Durch das Wachsen der anderen vier Flächen des Oktaeders bildet sich offenbar eine in allen Teilen gleiche Figur, die nur anders liegt, so wie es in der obenstehenden Abbildung 2 angedeutet ist. Die beiden Körper sind einander kongruent, verhalten sich insbesondere nicht wie zwei Spiegelbilder.



Übergangsformen von Kristallen des regulären Systems. 1. Oktaeder mit abgestumpften Kanten. 2. Symmetrische Tetraeder. 3. Vereinigung von Würfel und Tetraeder. 4. Umwandlung des Pyramidenwürfels in den Pentagondodekaeder (durch Ausbildung der schraffierten Flächen). 5. Pendagondodekaeder.

Wenn wir einen Tetraeder mit einem Würfel vereinigen, so wird dadurch der letztere nur an vier seiner Ecken abgestumpft, während die vier anderen unverändert bleiben (s. die obenstehende Abbildung 3). Diese gar nicht mehr regelmäßig aussehende Figur hat aber immer noch die drei senkrecht zueinander stehenden gleichlangen Achsen.

Lassen wir endlich aus dem vierundzwanzigseitigen Pyramidenwürfel durch Hemiedrie einen zwölfseitigen Körper entstehen, so haben wir das Pentagondodekaeder, dessen wieder ganz gleiche Flächen reguläre Fünfecke bilden (s. die obenstehenden Abbildungen 4 und 5).

Alle Körper, welche die Bedingung erfüllen, drei gleiche senkrecht aufeinanderstehende Achsen zu haben, bilden die erste Gruppe der Kristallformen, das reguläre oder tesserale System. Trotz der Verschiedenheit ihrer äußeren Begrenzungen haben die diesem System angehörenden Kristalle wegen jener einfachen Achsenverhältnisse große physikalische Verwandtschaft zueinander.

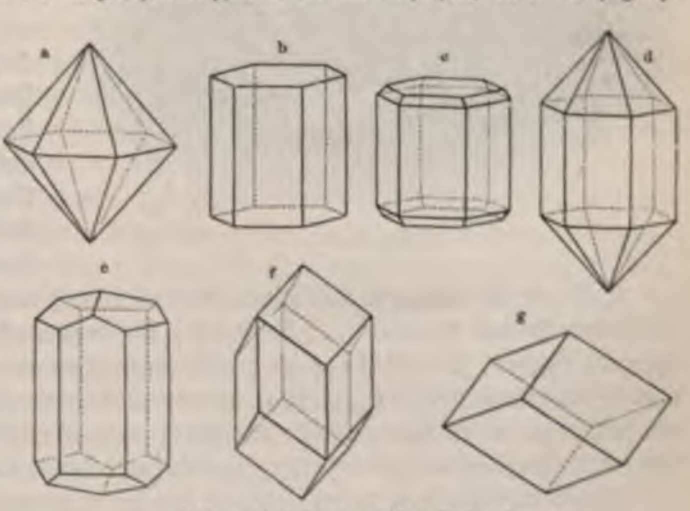
Andere Symmetrieverhältnisse entstehen, wenn die Kristallformen sich wieder auf drei aufeinander senkrecht stehende Achsen aufbauen, von denen aber nur zwei die gleiche Länge haben, die dritte länger oder kürzer ist. Dieses System nennt man das **tetragonale** oder **quadratische**,



Kristallformen des tetragonalen oder quadratischen Systems.
1. Achsenstellung des tetragonalen Systems. 2. Tetragonale Doppelpyramide. 3. Abgestumpfte Doppelpyramide des Blutlaugensalzes. 4 und 5. Entwickelung des tetragonalen Prismas aus der tetragonalen Doppelpyramide. 6. Quadratisches Prisma. 7. Verbindung des quadratischen Prismas mit der Pyramide. Vgl. Text, S. 503 und 504.

weil die beiden gleichen Achsen als Diagonalen eines Quadrates aufzufassen sind. Die dritte, abweichende Achse ist die Hauptachse und steht stets senkrecht (s. die obenstehende Abbildung 1).

Die erste Figur ist hier wieder ein **Oktaeder**, das aber in der senkrechten Dimension länger oder kürzer ist als das reguläre Oktaeder und **Quadratoktaeder** oder eine **tetragonale Doppelpyramide** (s. die obenstehende Abbildung 2) heißt. Die Hauptachse steht hier wie in allen anderen Kristallsystemen mit ungleichen Achsen in keinem einfachen, etwa durch ganze Zahlen ausdrückbaren Verhältnis zu den anderen Achsen; doch bleibt dieses bei derselben Substanz immer gleich. Bei den Kristallen des Blutlaugensalzes z. B., die in diese Klasse gehören, steht die Hauptachse zu den beiden gleichen Nebenachsen im Verhältnis von 1,77 zu 1 (s. die obenstehende Abbildung 3).



Formen des hexagonalen Systems.
a Pyramide. b Prisma. c d Kombination von Prisma und Pyramide. e f Prisma mit Rhomboeder. g Rhomboeder. Vgl. Text, S. 504.

Wir nehmen nun unter Einhaltung der betreffenden Bedingung für die Achsen dieselben Formveränderungen an der Kristallgrundform dieses Systems vor, wie beim regulären; z. B. stumpfen wir die vier Kanten, welche das Quadrat der Pyramidengrundflächen bilden, ab, wodurch je nach dem Grade der Abstumpfung die beiden obenstehenden Figuren 4 und 5 entstehen. Die letztere Form zeigt das arsenïksaure Kali. Schließlich bleiben die beiden Pyramiden ganz fort,

und wir erhalten die dem Würfel analoge Form dieses Systems, das **quadratische Prisma** (s. die obere Abbildung 6, S. 503). Durch Abstumpfung der acht Ecken dieses Körpers erwächst seine Verbindung mit einer Pyramide (s. die obere Abbildung 7, S. 503), während die unter 3, S. 503, abgebildete Form des Blutlaugensalzkristalls entsteht, wenn wir die obere und untere Spitze unseres Quadratoktaeders abschneiden. Noch eine ganze Anzahl von ähnlichen Kombinationen wäre anzugeben, die alle in der Natur auftreten und die Grundbedingung dieses Systems erfüllen.

Ein **drittes System** entsteht durch das Vorhandensein von **vier** Achsen, von denen drei untereinander gleich sind, in derselben horizontalen Ebene liegen und sich unter gleichen Winkeln, also von 120°, schneiden, während die dritte, die Hauptachse, senkrecht auf der Ebene der anderen steht und eine von den anderen Achsen verschiedene Länge hat. Da durch die drei Nebenachsen ein reguläres Sechseck gebildet wird, nennt man dieses System das **hexagonale**.



Bergkristalle.

Einige Hauptformen dieses Systems sind auf S. 503 unten, a bis f, dargestellt, die in ähnlicher Weise entstehen, wie wir es bei den anderen Systemen beschrieben haben. Wir erhalten also lauter sechseckige Körper, Prismen u. s. w. Bergkristall und Quarz kristallisieren hexagonal (s. die nebenstehende Abbildung), ebenso die in unserer Tafel der Edelsteine, S. 434, abgebildeten Kristalle des Topas, Smaragd, Saphir und Chrysoberyll.

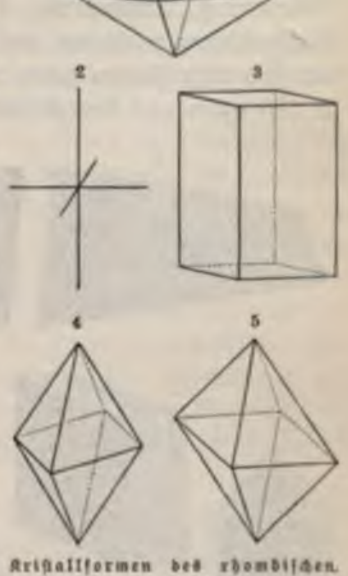
Diese wie alle übrigen Kristallformen können nun auch durch **Hemiedrie** scheinbar recht verschiedene Formen hervorbringen. Lassen wir z. B. jede zweite Seite der hexagonalen Doppelpyramide wachsen, so entsteht aus der zwölfflächigen Figur eine sechsflächige, ein **Rhomboeder** (g der unteren Abbildung, S. 503), der mit seiner Ursprungsform wenig Ähnlichkeit zeigt und doch wegen der gleichartigen Achsenverhältnisse große physikalische Verwandtschaft zu ihr hat. Der uns wegen seiner doppeltbrechenden Eigenschaften bekannte Kalkspat zeigt diese Kristallform.

Ein **viertes System**, das **rhombische**, hat wieder nur drei Achsen, die auch aufeinander senkrecht stehen, aber im Gegensatze zu denen der beiden ersten Systeme alle verschieden lang sind (s. die Abbildung 2, S. 505). Die mit ihnen gebildete Doppelpyramide hat also ein **Rhombus** zur Grundfläche und ist wie auf zwei Seiten zusammengedrückt (s. die Abbildung 1, S. 505). In dieser Form kristallisiert der **Schwefel**. Bezeichnen wir die längere Diagonale des Rhombus dieses Systems mit 1, so ist beim Schwefel die andere Diagonale 0,8 und die Hauptachse 1,9 lang.

Auch die rhombische Pyramide geht durch Abstumpfung der horizontalen Kanten in ein rhombisches Prisma über, das vier schiefwinkelige Kanten hat, während die oberen und unteren Flächen senkrecht zu den vier anderen stehen (s. die untenstehende Abbildung 3). Unter den verschiedenen hierher gehörigen Kombinationen heben wir eine durch Abstumpfung zweier gegenüberliegender Kanten der rhombischen Prismenpyramide entstehende sechseckige Säule hervor, deren Querschnittfigur im Gegensatze zu der der Säulen des hexagonalen Systems andere Winkel haben kann, als sie den unter 120° sich schneidenden Achsen des letzteren entsprechen (s. die Abbildung 2, S. 506).

Im rhombischen System kristallisiert der schon mehrfach erwähnte Turmalin, der Schwerspat, der Aragonit u. s. w., vielfach in flachen Tafeln, aus.

Ein besonderes Interesse bieten hier die hemiedrischen Formen, weil, je nachdem die einen oder die anderen Flächenpaare sich ausbilden, aus der rhombischen Doppelpyramide Tetraeder entstehen, die sich nicht wie die gleichen Formen der vorigen Systeme decken, obgleich sie ganz gleiche Winkel- und Flächenverhältnisse aufweisen; sondern sie verhalten sich wie ein Spiegelbild zum Objekt, denn rechts ist hier mit links vertauscht (s. die Abbildungen 1, S. 506). Wir haben schon bei der Weinsäure (S. 477) gesehen, inwiefern uns diese merkwürdigen Formenpaare besonders interessieren.



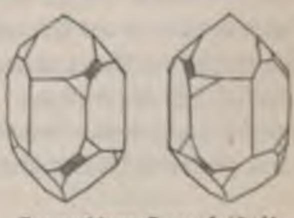
Kristallformen des rhombischen, monoklinen und triklinen Systems. 1. Rhombische Pyramide. 2. Achsenstellung des rhombischen Systems. 3. Rhombisches Prisma. 4. Monokline Doppelpyramide. 5. Trikline Doppelpyramide. Vgl. Text, S. 504—506.

Das fünfte Kristallsystem wird als monoklines bezeichnet. Die drei Achsen sind alle verschieden lang, aber es steht eine nicht mehr senkrecht auf der Ebene der beiden anderen Achsen, wie die nebenstehende Doppelpyramide (4) zeigt.

Auch aus diesen Pyramiden bilden wir entsprechende andere Figuren, wie in den übrigen Systemen. Das monokline Prisma unterscheidet sich vom rhombischen nur durch die schiefe Stellung der Mittellinie zu seiner Basis (s. die Abbildung 3, S. 506).

In diesem System bildet der Gips in seinem bekannten Kristalle das sogenannte Marienglas, ferner kristallisieren monoklin der Eisenvitriol, das Glaubersalz, die Soda u. s. w.

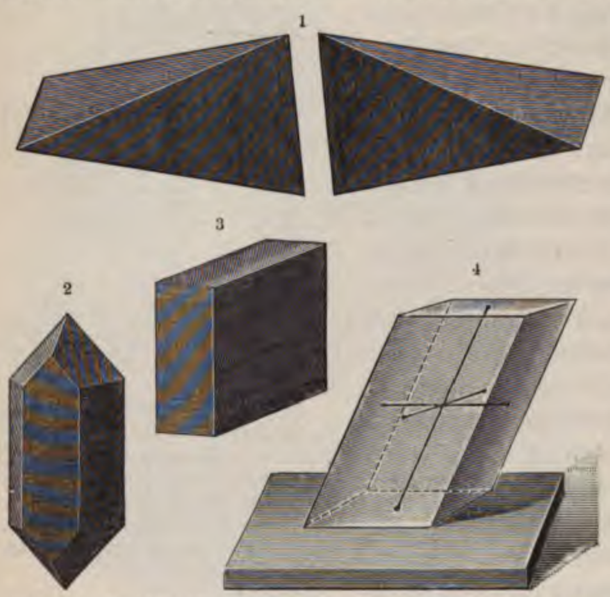
Die sechste Gruppe endlich bildet das trikline System, in dem alle drei Achsen schiefe Winkel gegeneinander bilden und ungleich lang sind. Da aber auch hier wie in allen Kristallen diese Achsen sich in ihrer Mitte schneiden, so gestaltet die Natur auch mit diesen wenigen übrigbleibenden Symmetriebedingungen noch regelmäßig umgrenzte Figuren, bei denen immer zwei Kantenflächen parallele Lage haben.


Verwachsene Quarzkristalle. Vgl. Text, S. 506.

Die Grundform ist die trikline Doppelpyramide, die sich von den anderen nur dadurch unterscheidet, daß erstens ihre Basis wie in dem vorigen System nicht senkrecht zu der Verbindungslinie der Pyramidenspitzen liegt, und zweitens auch die Diagonalen dieser Basis sich nicht senkrecht schneiden (s. die obenstehende Abbildung 5).

Auch aus ihr entstehen wieder trikline Prismen (s. die untenstehende Abbildung 4) und andere Formen. Der Kupfervitriol und gewisse Feldspate sind triklin.

Mit diesen sechs Hauptgruppen ist die übliche Einteilungsweise der Kristallformen erschöpft, wenn wir hier auch nur wenige der Untergruppen erwähnen konnten, nicht zu reden von den geradezu zahllosen Spielarten, die in der Natur vorkommen. Denn die Kristalle eines bestimmten Stoffes können innerhalb der ihnen zukommenden Grundform so viele Kombinationen von Abstumpfung, Verlängerung, Verschiebung der Flächen, von Hemiedrie, Zwillingsbildung, Einschachtelung annehmen, daß es oft sehr schwer fällt, einen solchen Kristall, der an hundert und mehr Flächen haben kann, in das richtige System unterzubringen. Wir geben auf S. 505 unten zwei Quarzkristalle wieder, die man allerdings wohl sofort als hexagonal erkennt, die aber noch eine große Zahl durch Abstumpfung u. s. w. entstandener Flächen enthalten. Trotzdem hat jede Fläche, Ecke und Kante des Kristalles ihre symmetrisch zugehörige. Die beiden nebeneinander gestellten, sonst trotz ihrer komplizierten Flächenverhältnisse ganz gleichen Kristalle verhalten sich zueinander wie Spiegelbilder. Es gibt geradezu keinen rein mathematisch zu erdenkenden, symmetrisch von Ebenen begrenzten Körper, der nicht auch von der Natur als Kristall hervorgebracht worden wäre.



1. Rhombische Tetraeder. 2. Sechseckige Säule des rhombischen Systems. 3. Monoklines Prisma. 4. Triklines Prisma. Vgl. Text, S. 505.

Dieses bei aller Mannigfaltigkeit streng mathematische Gesetz, nach dem wir die Materie in den festen Zustand übergehen sehen, beweist, daß in jenen molekularen Welten, die sich untereinander zu unveränderlichen Systemen verbinden, Gesetzmäßigkeiten walten, die aus diesen augenfälligen Formen einst auf streng mathematischen Wegen herzuleiten sein werden, ebenso wie man aus den epizyklischen Bewegungsfiguren des Ptolemäischen und des Kopernikanischen Planetensystems erst nachträglich die Gesetze der Planetenbewegungen und die Notwendigkeit des inneren Zusammenhanges dieser Vielheit mit einem einzigen Grundgesetze, dem der Schwere, nachzuweisen vermochte. Auf die Beziehungen, welche man bis jetzt zwischen den Formen der Kristalle und ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften aufgefunden hat, kommen wir noch zurück.

5. Atomgewicht und molekularer Bau.

Auf der Suche nach den Gesetzen, denen die chemischen Erscheinungen unterworfen sind, stoßen wir in erster Linie auf eine Gesetzmäßigkeit, die alle chemischen Verbindungen gleichmäßig beherrscht. Es ist die der einfachen Zahlenverhältnisse, in denen die kleinsten Teile der

Stoffe miteinander in feste Verbindungen treten, und durch die sich die Verbindungen von den bloßen physikalischen Gemischen unterscheiden, die in jedem Verhältnis möglich sind. Wir haben uns deshalb schon bei Beginn der Aufzählung der chemischen Verbindungen mit diesen Gesetzmäßigkeiten beschäftigen müssen, durch welche die Verbindungen selbst allein zu charakterisieren und in übersichtliche Ordnung zu bringen sind. Hier müssen wir nun näher darauf zurückkommen, weil diese Regeln des molekularen Aufbaues offenbar aus allgemeinen physikalischen Gesetzen der Materie fließen, deren Erkenntnis wir anstreben.

Es fragt sich zunächst, **auf welche Weise wir zu der Erkenntnis gelangt sind**, daß sich z. B. **immer zwei Atome Wasserstoff mit einem Atom Sauerstoff zu Wasser verbinden**, und inwieweit diese Erfahrungen strenge Gültigkeit haben.

Sie stützen sich auf folgende Tatsachen: Zersetzen wir 18 g Wasser durch den elektrischen Strom in seine Bestandteile, so zeigt es sich, daß der erhaltene Sauerstoff 16 g und der Wasserstoff 2 g wiegt, zusammen also wieder 18 g, wie es nach dem obersten Gesetz von der Erhaltung der Materie notwendig ist. An Raumausdehnung aber nimmt dabei der Sauerstoff nur die Hälfte des vom Wasserstoff erfüllten Raumes ein, woraus wir ersehen, daß Sauerstoff 16mal schwerer ist als Wasserstoff, oder daß das spezifische Gewicht des Sauerstoffs in Gewichtseinheiten des Wasserstoffs gleich 16 ist. Soweit ist das Ergebnis unantastbar. Aber wir haben bereits erfahren, daß diese Zahl 16 das Atomgewicht darstellt, was bedeutet, daß der kleinste, wohl nicht mehr meßbare, aber doch nicht unendlich kleine Teil Sauerstoff, der mit irgend einem anderen Teil einer Materie in Beziehungen treten kann, 16mal schwerer ist als ein ebensolcher Teil Wasserstoff.

Dies ist offenbar etwas ganz anderes, als was wir über das spezifische Gewicht dieser Stoffe aussagen konnten. Denn für dieses ist der Teilbarkeit **keine** Grenze gesetzt. Wenn zwar auch bei Annahme der Atome jedes Mischungsverhältnis denkbar ist, da ein Atom des einen Stoffes mit beliebig vielen des anderen zusammentreten kann, so ist es doch ohne weiteres wahrscheinlich, daß einfache Mischungsverhältnisse vorherrschen werden, die sich in kleinen ganzen Zahlen ausdrücken, unter der Voraussetzung irgendwelcher gesetzmäßiger Beziehung, die die Atome verknüpft.

Obgleich wir die Gesetze noch nicht kennen, aus denen die bekannten Regeln für die chemischen Verwandtschaften der Stoffe als eine Notwendigkeit folgen, wie die Planetenbewegungen aus dem Gesetz der allgemeinen Anziehung, so setzen wir doch angesichts unserer Erfahrungen über die anderen Naturgesetze voraus, daß auch der Ausdruck dieses unbekannten Gesetzes der chemischen Anziehung ein einfacher ist und einfache Beziehungen bevorzugt, und erst durch Anhäufung, durch einen Aufbau sich verwickeltere Verhältnisse ausgestalten können, wie wir es überall in der Natur wahrnehmen. Da wir solche **einfachen Gewichtsverhältnisse bei den chemischen Verbindungen** beobachten, so ist es wieder wahrscheinlich, daß wirklich solche **Atome existieren, die nicht unendlich klein, aber für uns unteilbar sind.** Aus unseren bisherigen physikalischen Betrachtungen ging bereits Ähnliches hervor. Aber es handelte sich dort nur um Moleküle, die physikalisch immer als ein Ganzes wirken, während der Chemiker sie wieder teilt und aus Atomen seiner Grundstoffe zusammensetzt. Wir sind deshalb wohl berechtigt, von **Atomgewichten** dieser Stoffe zu reden.

Dagegen ist durch das Ergebnis unseres Experimentes der Wasserzersetzung keineswegs ohne weiteres bewiesen, daß die Atomgewichte von O und H nun auch wirklich in jenem Verhältnis von 1 zu 16 stehen. Es muß offenbar erst gezeigt werden, daß z. B. in der vorliegenden Verbindung des Wassers nicht etwa mehrere Atome Sauerstoff mit je zwei Atomen

Wasserstoff zusammengetreten sind, oder, in der Sprache der uns bereits wohlbekannten chemischen Formeln ausgedrückt, Wasser nicht etwa HO statt H_2O zu schreiben ist. Nehmen wir das Atomgewicht von O gleich 8 statt 16, so kommen wir zu denselben experimentellen Ergebnissen. 1 g Wasserstoff und 8 g Sauerstoff geben zusammen 9 g Wasser; das ist genau die Hälfte der Summe beider Bestandteile des ersten Versuchs, das Sauerstoffatom aber wird dabei nur halb so groß als vorher. Offenbar können noch beliebig viele entsprechende Annahmen gemacht werden. Nur die Gesamtheit der Erfahrungen kann darüber entscheiden, welches die kleinste Verhältniszahl ist, mit der ein Stoff mit einem anderen in Verbindung tritt, und diese ist dann nach unserer Definition vom Atom als sein Gewicht anzusehen. So zeigt sich, daß wir aus 44 g Kohlensäure 32 g Sauerstoff abscheiden können, während der Rest, also 12 g, Kohlenstoff ist. Aus dieser Erfahrung allein könnten wir schließen, daß das Atomgewicht des Kohlenstoffs 12 und das des Sauerstoffs 32 sei, also noch einmal so groß, als wir es in unserem ersten Beispiel fanden. Die Formel der Kohlensäure würde dann CO sein. Da wir aber beim Wasser bereits eine kleinere Gewichtsmenge Sauerstoff ausgeschieden hatten, so ist diese Formel falsch; sie muß mindestens CO_2 lauten, drückt somit aus, daß zwei Atome Sauerstoff mit einem Atom Kohlenstoff zusammengetreten sind. In Wirklichkeit gibt es ja auch, wie wir wissen, noch eine andere Verbindung dieser beiden Stoffe, die jener ersten Formel genügt, das Kohlenoxydgas, von welchem auf 12 Gewichtsteile Kohlenstoff immer nur 16 Sauerstoff ausgeschieden werden können.

Wie wir nun weiter die so ungemein zahlreichen Verbindungen des Sauerstoffs untersuchen mögen, immer stoßen wir auf Gewichtsverhältnisse, in denen der Sauerstoff mit Vielfachen der Zahl 16 vertreten ist; niemals tritt eine kleinere Zahl, also etwa 8, auf. Dies überzeugt uns, daß 16 das Atomgewicht des Sauerstoffs ist, und daß in seiner Verbindung mit dem Wasserstoff, dem Wasser, zwei Atome dieses Elementes enthalten sein müssen. Auch die übrigen Erfahrungen über den Wasserstoff zeigen, daß er in vielen Verbindungen in halb so großen Gewichtsverhältnissen enthalten ist wie im Wasser. So ist er sogar mit dem Sauerstoff selbst im Wasserstoffsuperoxyd im Verhältnis von 1:16 verbunden. Wir könnten also die Formel dieses Stoffes HO schreiben, wenn nicht andere Erfahrungen, die uns aus der Lehre von den chemischen Valenzen schon teilweise bekannt sind, zur Annahme zwängen, daß hier 2 Atome von beiden Elementen miteinander verknüpft sind, demnach die Formel H_2O_2 lauten muß, wobei an den Gewichtsverhältnissen nichts geändert wird.

Die Lehre von diesen Gewichtsverhältnissen, die eine praktisch wichtige Rolle spielt, um umgekehrt wieder die Mengen zu bestimmen, welche zur Hervorbringung gewisser Verbindungen nötig sind, nennt man Stöchiometrie. Sie zeigt, sobald die Atomgewichte der Grundstoffe bekannt geworden sind, welche Menge derselben wir aus ihren Verbindungen erhalten können. Zum Beispiel können wir uns die Frage stellen, wieviel Eisen aus dem sogenannten Schwefelkies, dessen Formel FeS_2 ist, gewonnen wird, wenn wir den Schwefel von ihm trennen. Sind 120 g Schwefelkies gegeben, und wissen wir, daß das Atomgewicht des Schwefels 32 ist, so erhalten wir das gewünschte Gewicht des reinen Eisens gleich $120-2\times32=56$ g. Gleichzeitig muß diese Zahl 56 das Atomgewicht des Eisens sein. Dementsprechend löst man auch für andere Zahlenverhältnisse mit Hilfe einer Proportionsrechnung die Aufgabe. Hätten wir etwa 200 g Schwefelkies, so steht diese Menge zu 120, dem Molekulargewichte der Verbindung $(2\times32+56)$, im Verhältnis von 5:3. Dieses Verhältnis gilt auch für die Menge des Schwefels zu seiner doppelten Atomgewichtszahl. Das auf diese Weise gefundene Gewicht des

Schwefels vom Gesamtgewicht der Verbindung in Abzug gebracht, gibt das Gewicht des in ihr enthaltenen Eisens; also $200 - \frac{5}{3} \times 64 = 93{,}33$ g. Wollen wir auch aus dieser Gewichtsmenge wieder das Atomgewicht des Eisens finden, so haben wir sie umgekehrt mit $\frac{3}{5}$ zu multiplizieren und erhalten abermals 56.

Mit diesen Atom-, bez. Molekulargewichten der Stoffe stehen ihre physikalischen Eigenschaften im engsten Zusammenhang, und es wird nun unsere Aufgabe sein, hierauf näher einzugehen. Vorher aber betrachten wir die eigentümlichen Beziehungen, die zwischen den Atomgewichten der Elemente selbst ins Auge springen.

Im Jahre 1808 hatte Dalton eine erste Atomgewichtstabelle aufgestellt, während Avogadro 1811 den Begriff des Molekulargewichtes erst genauer präzisierte und die nach ihm benannte Regel aufstellte, daß die kleinste Menge eines Elementes, welche in dem Molekül einer Verbindung angetroffen wird, seinem Atomgewicht entspricht. Auf der Basis dieser Regel und den Anschauungen der Thermodynamik, deren Grundzüge wir im vorangehenden gegeben haben, bauen sich die modernen Theorien der Chemie auf.

Wir haben bereits auf S. 425 eine Tabelle der Atomgewichte gegeben, wie sie den neuesten Bestimmungen entsprechen. Hätten wir eine etwas ältere Zusammenstellung gebracht, so würde die Eigentümlichkeit dieser relativen Gewichtsmengen, sich sehr nahe bei ganzen Zahlen zu halten, noch mehr aufgefallen sein, denn diese älteren Bestimmungen bewegen sich ausschließlich in solchen ganzen Zahlen. Wir werden auch im folgenden hauptsächlich nur diese gebrauchen. Die in neuerer Zeit als notwendig erkannten Abweichungen von diesen ganzen Zahlen zeigen deutlich den Charakter von Korrektionen, die aus irgend welchen, noch nicht bekannten Gründen bei diesen Zahlen vorgenommen werden mußten. Überhaupt lassen sich die weiter unten zu besprechenden Gesetzmäßigkeiten auf chemischem Gebiete in den meisten Fällen noch nicht in exakte Zahlenbeziehungen kleiden, wie wir es bei den physikalischen und noch mehr bei den astronomischen Erscheinungen gewohnt sind. Würde man aber bei diesen Zahlen, z. B. für die Strahlenbrechung in der Luft, gewisse Korrektionen weglassen, so würde dadurch die tatsächlich vorhandene Einfachheit der Bewegungsgesetze stark verwischt werden. Unser Studium in den Gebieten der chemischen Wissenschaft liegt aber noch in einem solchen Anfangsstadium, in welchem die Unbekanntschaft mit solchen Korrektionsgliedern wohl vorausgesetzt werden kann.

Nehmen wir an, die Atomgewichte, in Einheiten desjenigen des Wasserstoffs als des leichtesten Elementes, beständen aus ganzen Zahlen, so würden wahrscheinlich diese Elemente einen inneren Zusammenhang haben, etwa wie die Verbindungen sich aus ganzen Vielfachen jener Atomgewichte selbst zusammensetzen. Mit anderen Worten, die Elemente wären selbst wieder Verbindungen von Urelementen, die wir nur nicht imstande sind, zu trennen. Tatsächlich hat sich ja mit dem Fortschreiten der chemischen Zerlegungskunst die Zahl der bis dahin bekannten Verbindungen immer weiter vermindert, während anderseits immer neue Verbindungen der bekannten Stoffe wie auch neue Elemente hinzu entdeckt worden sind. So sind erst 1807 und 1808 von Davy Kalium, Natrium, Calcium, Barium, Strontium, Magnesium, und das Aluminium erst 1827 von Wöhler entdeckt worden; bis dahin hielt man die Erden dieser leichten Metalle für die Elemente selbst.

Nur um den sich hieran knüpfenden Ideengang zu beleuchten, ohne die Behauptung aufzustellen, daß die Verhältnisse wirklich so liegen, könnten wir z. B. annehmen, der Wasserstoff selbst sei dieses Urelement. Dann würde eine besonders feste Verknüpfung von vier seiner Atome das Helium sein, dessen Atomgewicht 4 ist. 7 dieser Uratome würden das

Lithium, 12 den Kohlenstoff, 14 den Stickstoff, 16 den Sauerstoff ergeben, und so fort. Daß allein die verschiedene Verkettung gleicher Atome Körper von sehr verschiedenen Eigenschaften bilden kann, haben wir wiederholt gesehen, am deutlichsten bei den allotropen Modifikationen, z. B. des Sauerstoffs, der bei der Verbindung von zweien seiner Atome die gewöhnlichen, bei seinen dreiatomigen Molekülen als Ozon dagegen andere Eigenschaften hat und wohl sicher als ein ganz anderes Element angesprochen werden müßte, wenn seine Zerlegung in gewöhnlichen Sauerstoff nicht möglich wäre. Wir würden also nur ein einziges Urelement haben, jenes Uratom, das uns bei all unseren Betrachtungen vorschwebte, und dessen Bewegungen und Gruppierungen allein die ganze Vielartigkeit der Naturerscheinungen hervorbrächte.

Unter diesem Gesichtspunkt ist es von größter Wichtigkeit, Gesetzmäßigkeiten unter den Atomgewichten der Elemente aufzudecken. Wir gruppieren sie zu dem Zwecke zunächst nach aufsteigender Reihenfolge und grenzen nach dem Vorgange von Mendelejeff und Lothar Meyer besondere Gruppen ab.

Das natürliche System der chemischen Elemente.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
H 1							He 4 16	
Li 7 16	Be 9 15	B 11 16	C 12 16	N 14 17	O 16 16	F 19 16	Ne 20 20	
Na 23 16	Mg 24 16	Al 27 17	Si 28 20	P 31 20	S 32 20	Cl 35 20	A 40 (20)	
K 39 24	Ca 40 25	Sc 44 26	Ti 48 24	V 51 24	Cr 52 27	Mn 55 25	? (60) (22)	Fe 56 Co 59 Ni 59
Cu 63 23	Zn 65 23	Ga 70 19	Ge 72 19	As 75 19	Se 79 17	Br 80	Kr 82 (22)	
Rb 86 22	Sr 88 24	Y 89 25	Zr 91 27	Nb 94 26	Mo 96 31	?	? (104) (24)	Ru 102 Rh 103 Pd 106
Ag 108 25	Cd 112 25	In 114 24	Sn 118 22	Sb 120 24	Te 127 23	J 127 29	X 128	
Cs 133 33	Ba 137 34	La 138 35	Ce 140	Nd 144 39	Sm 150 34	Gd 156		
Er 166 31	Dp 171 29	Yt 173 31		Ta 183 25	W 184			Os 191 Ir 193 Pt 195
Au 197	Hg 200	Tl 204	Pb 207 25	Bi 208	—	—		
—	—	—	Th 232	—	U 240	—		

Diese Zusammenstellung zeigt acht fast vollständige Horizontalreihen, denen noch eine unvollständige folgt, und jede Reihe enthält, wieder mit einigen Ausnahmen, acht Elemente, wenn man Fe, Co, Ni, dann Ru, Rh, Pd und endlich Os, Ir, Pt, die untereinander sehr ähnlich sind und auch nahezu gleiche Atomgewichte haben, als je ein Element rechnet, das etwa in verschiedenen Modifikationen oder mit einem unbekannten Stoffe gemischt in diesen drei Stufen auftritt. Wir haben ihnen deshalb eine besondere Vertikalreihe eingeräumt. Während bei dieser Zusammenstellung die horizontal nebeneinanderstehenden Elemente sich nur wenig in ihrem Atomgewichte voneinander unterscheiden, haben sie doch chemisch sehr verschiedene Eigenschaften. Aber es zeigt sich, daß in den Vertikalreihen alle die Elemente untereinander stehen, die einander chemisch ähnlich sind; so stehen in der ersten Reihe Lithium, Natrium, Kalium, weiter

Kupfer, Silber, Gold, in der zweiten Reihe Beryllium, Magnesium, Calcium, in der dritten die Erdmetalle der Aluminiumgruppe, in der vierten unter dem Kohlenstoff das Silicium, dann das Blei mit einer Anzahl der in seine Gruppe gehörenden Elemente, in der fünften Stickstoff, Phosphor, Arsen, Antimon, in der sechsten Sauerstoff, Schwefel, Selen, in der siebenten Fluor, Chlor, Brom und Jod, und endlich in der achten Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon, also alle die neuen in der Luft kürzlich entdeckten Elemente. In der Tafel sind neben den Atomgewichten ihre Differenzen mit dem nächsten in der Vertikalreihe stehenden Element angeführt, und es fällt sofort auf, daß diese Differenzen einander ähnlich sind und nach unten mit den Atomgewichten selbst steigen. Die chemischen Eigenschaften der Elemente erweisen sich also als periodische Funktionen ihrer Atomgewichte, ihre Eigenschaften wiederholen sich mit entsprechenden Abstufungen ihrer Kraft, sobald eine bestimmte Anzahl jener hypothetischen Uratome zusammentreten. Wenn z. B. 16 jener Einheitsatome zum Natrium treten, so erhalten wir das etwas weniger reaktionsfähige Kalium, ebenfalls 16 Einheiten führen vom Magnesium zum Calcium, die gleiche Zahl vom Kohlenstoff zum Silicium oder vom Sauerstoff zum Schwefel und vom Fluor zum Chlor. Zwischen anderen Elementen herrscht als Differenz 20, ferner 24 vor, wenn wir von Abweichungen einer Einheit absehen, die oft noch innerhalb der Unsicherheit der Bestimmung des Atomgewichtes selbst liegen. Diese Verhältnisse sind so offenkundig, daß man mit ihrer Hilfe in den seinerzeit noch vorhanden gewesenen Lücken Elemente mit ihren Atomgewichten und sonstigen Eigenschaften theoretisch eingeschaltet hat, die später wirklich aufgefunden wurden. Auch hier haben wir zwei solcher Lücken in der Reihe der indifferenten neuen Gase in der Luft mit den Gewichten 60 und 104 eingeschaltet. Es bestehen demnach Beziehungen zwischen den Atomgewichten der Elemente, wie wir sie auch bei ihren verschiedenen Verbindungen vor uns haben. Zum Beispiel unterscheiden sich de Molekulargewichte beim Kohlenoxyd und der Kohlensäure gleichfalls um jene 16 Einheiten, dem Atomgewicht des Sauerstoffs. Das gleiche ist beim Wasser und dem Wasserstoffsuperoxyd, der schwefligen Säure und der Schwefelsäure und im allgemeinen den Oxydulen und den Oxyden zu bemerken. Wir haben hier also einen sehr auffälligen Parallelismus, der durchaus zu der Vermutung berechtigt, daß wir in diesen ähnlichen Elementen nur besonders feste Verbindungen vor uns haben.

Sehr merkwürdig ist eine andere erst in jüngerer Zeit (1897) von Rydberg veröffentlichte Zusammenstellung. Nach dieser schreiten die Atomgewichte der Elemente, nach kleinen, als berechtigt erkannten Korrektionen, regelmäßig von Element zu Element um eine Einheit vorwärts, mit nur wenigen Lücken bei den höheren Zahlen, wo zum Teil noch neue Elemente zu erwarten sind. Es geschieht dies in folgender Weise: Wasserstoff beginnt mit 1. Ihm folgt Helium mit 2×2, dann Lithium mit $(2 \times 3) + 1$, Beryllium mit $(2 \times 4) + 1$, Bor mit $(2 \times 5) + 1$, Kohlenstoff mit 2×6, Stickstoff mit 2×7, Sauerstoff mit 2×8, Fluor mit $(2 \times 9) + 1$, Neon mit 2×10, Natrium mit $(2 \times 11) + 1$, Magnesium mit 2×12 und so fort. Dabei haben alle Elemente mit geraden Ordnungszahlen oder ohne das additive $+1$ auch eine gerade Wertigkeit, also 2 oder 4, wie Kohlenstoff, Sauerstoff, Magnesium; alle Elemente aber mit ungeraden Zahlen oder mit der zugefügten Einheit zeigen für diese Atomgewichte auch ungerade Valenzen, also 1, 3 oder 5, wie Wasserstoff, Natrium, Stickstoff, Fluor. Für diese sehr interessante Beziehung des Atomgewichtes zur Wertigkeit der Elemente können wir uns ganz gut eine Vorstellung machen. Sind die Atome der sogenannten Elemente wirklich aus jenen hypothetischen

Uratomen zusammengesetzt, so wird ein Aufbau aus einer kleinen geraden Zahl derselben Symmetriebedingungen schaffen müssen, die sich wieder durch gerade Zahlen ausdrücken, und umgekehrt. Denken wir uns z. B., um wieder eine Parallelanschauung zu geben, die Uratome seien Kugeln, so können deren vier immer nur eine vierseitige Figur, etwa ein Tetraeder, bilden, die für ein weiteres Wachstum vier Seiten bildet, drei Kugeln aber bilden ein Dreieck mit drei Möglichkeiten für den weiteren Ausbau und so fort.

Daß die Trennung der einzelnen Uratome voneinander so schwer, vielleicht überhaupt unmöglich ist, kann seinen Grund darin haben, daß sie sich wirklich berühren, was ja bekanntlich nicht bei den gewöhnlichen Atomen im Molekül und noch weniger bei den Molekülen unter sich der Fall sein kann, weil diese, wie erwiesen, noch Bewegungen gegeneinander ausführen. Solche Vereinigungen von Uratomen bilden dann wirklich stereometrische Körper, Urkristalle, die aus den Umgrenzungen der im Durchschnitt als kugelförmig zu betrachtenden kleinsten Materieteile bei ihren verschiedenen möglichen Lagerungen hervorgehen. Zwischen diese Uratome kann sich kein anderes drängen; die Stöße der freien Atome, welche wir als Ursache aller Erscheinungen angesprochen haben, bringen keine inneren Veränderungen, also keine Wärme, Licht u. s. w. in ihnen hervor, sondern bewegen nur den Komplex als Ganzes. Die Wirkungen des Urkristalls auf andere solche Vereinigungen können deshalb nur durch seine besondere Körperform bestimmt sein.

Es wurde gezeigt, daß die Atome der Elemente zu Molekülen in ganz bestimmter Weise zusammentreten, die durch ihre sogenannte Wertigkeit bedingt ist. Jene körperlich bestimmt umschriebenen Atome legen sich nicht mehr zu festen körperlichen Molekülen aneinander, denn wir wissen aus unserer Zusammenstellung der chemischen Verbindungen, daß die Atome mehr oder weniger locker zu Molekülen zusammentreten, da sie sich oft leicht wieder losreißen und durch andere ersetzen lassen. Außerdem haben auch die Erscheinungen der Wärme gezeigt, daß nicht nur die Moleküle gegeneinander, sondern auch die Atome in den Molekülen Bewegungen ausführen, die wir mit den Bewegungen der Planeten um ihre Sonnen verglichen haben.

Hierbei treten nun jene eigentümlichen Erscheinungen auf, die der Chemiker als die Wertigkeiten oder Valenzen der Elemente oder jener Atomkomplexe, die wir Radikale nannten, bezeichnet. Es zeigt sich nämlich, daß die Atome gewisser Elemente sich in Atomvereinigungen gegen andere Atome umtauschen lassen. So tritt in vielen Verbindungen leicht ein Atom Chlor an die Stelle eines Atoms Wasserstoff, ebenso ein Atom Brom, Jod oder Fluor. Man nennt deshalb die Atome dieser Elemente gleichwertig. Dagegen ist nicht möglich, ein Atom Sauerstoff an die Stelle von einem Atom Wasserstoff oder der oben noch weiter genannten Elemente zu setzen, sondern es müssen immer zwei Atome Wasserstoff für ein Atom Sauerstoff ausscheiden. Dagegen genügt von anderen Elementen, wie Schwefel, Calcium u. s. w., ein Atom, um sich an die Stelle von einem Atom Sauerstoff zu setzen. Diese Stoffe sind wieder mit dem Sauerstoff gleichwertig, während jene, mit dem Wasserstoff genannten, nur deren halbe Wertigkeit haben können. Auf dieselbe Weise hat man noch drei-, vier- und fünfwertige Elemente zusammengruppiert.

Ebenso haben wir, namentlich im Gebiete der organischen Verbindungen, eine Anzahl von Atomgruppen kennen gelernt, die in der Regel vereinigt von einer Verbindung zur anderen übergehen, wie es sonst nur die Atome tun, und die gleichfalls eine ganz bestimmte, aus ihrer atomistischen Zusammensetzung hervorgehende Wertigkeit haben, z. B. die Methylgruppe $-CH_3$, die wegen der ungesättigt bleibenden vierten Kohlenstoffvalenz einwertig ist, ferner

die zweiwertige Methylengruppe $-CH_2-$, die einwertige Hydroxylgruppe $OH-$, die ebenfalls einwertige Carboxylgruppe $COOH-$ oder die einwertige Phenylgruppe $-C_6H_5$, also den Benzolring mit einem fehlenden Wasserstoffatom, und so fort.

Man hat aus diesen Wahrnehmungen gefolgert, daß gewisse Atome der Atomgruppen ihre Anziehungskraft nur in bestimmten Richtungen äußern, die einen nur in einer, die anderen in zwei Richtungen u. s. w., was man durch die Striche an den betreffenden Symbolen ausdrückt. Es ist allgemein anerkannt, daß dies nur ein Notbehelf ist, der uns die Systematik der Verbindungen erleichtert, daß also diese Valenzen nichts über die wirklichen Verhältnisse der Atomeigenschaften auszusagen brauchen. Auch zeigt sich, daß durchaus nicht alle Erscheinungen der chemischen Verbindungen in dieses Schema zu bringen sind. Denn es gibt eine große Anzahl sogenannter ungesättigter Verbindungen, bei denen eine oder mehrere Valenzen überhaupt nicht zur Betätigung kommen, und beim Stickstoff sehen wir die Wertigkeit sogar zwischen 3 und 5 schwanken. In neuerer Zeit hat man solche Schwankungen der Wertigkeit auch an anderen Elementen entdeckt, sogar am Kohlenstoff. Außerdem ist die Kraft, mit welcher ein und dieselbe Valenz denselben Stoff anzieht, schwankend je nach den äußeren Umständen, insbesondere der Temperatur und dem Druck. Auch sonst zeigen diese chemischen Anziehungskräfte eine vollständige Verschiedenheit von den Gesetzen der allgemeinen Anziehung, die wir so sicher zu entwickeln vermochten. Nach diesen müßten die schwereren Moleküle auch die stärkste Anziehung, d. h. die vielseitigste Verwandtschaft, haben, während gerade sie im allgemeinen die trägsten sind, aber auch eine Regel in dieser Hinsicht nicht offenbaren.

Dagegen zeigt sich eine anders geartete Abhängigkeit der chemischen Anziehung von den Atomgewichten. Gehen wir in dem natürlichen System der Elemente in unserer Tafel auf S. 510 in horizontaler Richtung weiter, so stoßen wir von links nach rechts auf im Wesen immer verschiedenere Elemente, so daß die ganz links stehenden zu denen ganz rechts sich in einem gewissen polaren Gegensatz befinden. So haben wir in der ersten Reihe Lithium, Beryllium, Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Fluor, während allen voraus der Wasserstoff steht. Hier zeigen die entferntest stehenden Elemente Wasserstoff und Fluor auch die größte Verwandtschaft zueinander; gleichzeitig haben sie entgegengesetzte elektrische Eigenschaften, worauf wir zurückkommen. Man kann deshalb von positiven und negativen Elementen sprechen und zählt den Wasserstoff, die Metalle u. s. w. zu den positiven, die Halogene, Metalloide zu den negativen Elementen. In der Mitte zwischen beiden steht in jener ersten Reihe der Kohlenstoff, der also bald positiv, bald negativ zu wirken vermag, wodurch seine große Vielseitigkeit bei der Bildung von Verbindungen wesentlich unterstützt wird. Nur in dieser ersten Reihe, wo die Differenzen der Atomgewichte im Verhältnis zu diesen selbst noch groß sind, haben die benachbarten Elemente noch merkliche Verwandtschaft zueinander, während sie in den unteren Reihen immer geringer wird. Die in den Vertikalreihen untereinander stehenden Elemente haben gleiche positive oder negative Eigenschaften; sie können also leicht gegeneinander ausgetauscht werden, wie Natrium gegen Kalium, Fluor gegen Chlor u. s. w. Dies geschieht aber mit einer um so größeren Kraft, je geringer das Atomgewicht ist; Natrium vertreibt Kalium, Fluor das Chlor, aber nicht umgekehrt, wenigstens nicht unter sonst gleichen Verhältnissen. Dies können wir wohl begreifen, denn ein leichter Körper muß beweglicher sein als ein schwerer, weil er ja nicht die Anziehung ausübt, sondern angezogen wird.

Freilich verlangen die Gesetze der Schwerkraft, auf welche mit den notwendigen Ergänzungen gewiß einmal die Bewegungen der Atome zurückgeführt werden, daß alle Körper gleichstark

von der gleichen Masse angezogen werden; eine Feder fällt im leeren Raume so schnell wie ein Stein. In den molekularen Räumen müssen sich die Dinge offenbar anders verhalten. Die Uratome, welche die Bewegungen der chemischen Atome bewirken, sind im Verhältnis zu diesen unermeßlich viel größer, als ihnen gegenüber die wirklichen Planeten sind, an denen wir die Gravitationsgesetze studiert haben. Vergegenwärtigen wir uns, daß nach den auf S. 104 entwickelten Anschauungen die anziehende Wirkung einer Masse dadurch entsteht, daß sie einen Teil der Stöße der Uratome auffängt und so hinter sich einen „Gravitationsschatten" bildet, so wird es uns einleuchten, daß die betreffenden Verhältnisse wesentlich andere werden müssen, wenn wegen der Kleinheit der Masse diese Stöße nur relativ selten erfolgen. So ergibt sich, daß die Anziehungskraft bei Massen von der Größenordnung der chemischen Atome schneller abnehmen muß, als es dem bloßen Massenverhältnis entspricht. Die Geschwindigkeit der Atome wird durch die Stöße der Uratome um so mehr zunehmen, je kleiner jene sind. Zwar ist dann diese Geschwindigkeit nicht ohne weiteres gegen den Atomkomplex gerichtet, an den sich das betreffende Atom gliedern soll, aber jene größere Beweglichkeit erleichtert ihm diese Angliederung, wenn sie durch andere Umstände eingeleitet wird. Bald werden wir dies noch besser verstehen.

Es treten jedenfalls hier zwei Wirkungen miteinander in Widerstreit, die Polarität und das Atomgewicht. Dadurch entsteht die scharfe Trennung der Horizontalreihen unseres natürlichen Systems der Elemente: dem stark negativen Fluor folgt das stark positive Natrium auf der nächsten Horizontalreihe. Bezöge man die Gesamtwirkung auf ein in der Mitte stehendes Normalelement, so würde sie durch eine Kurve veranschaulicht werden können, die, von den Elementen mit kleinem Atomgewicht beginnend, in immer flacher werdenden Wellen so vielmal auf und ab steigt, als Horizontalreihen in unserem System vorhanden sind. Solche Wellenlinien, die sich auf die Eigenschaften der Elemente beziehen, werden wir noch weiter unten (S. 541) kennen lernen.

Wir müssen nun versuchen, uns eine Vorstellung zu machen, wie die Vereinigung der Atome nach ihren Valenzen zu stande kommt, wobei es uns wohl bewußt bleibt, daß wir ein durchaus hypothetisches Gebiet betreten. Jede Hypothese aber, die auf dem Grund allgemeiner Erfahrungen über das Wesen von Massenbewegungen und Gruppierungen aufgebaut werden kann, hat mehr Wert für uns als jene rein schematische Zusammenfassung, die bestimmte Richtungen für die chemische Anziehungskraft annimmt, eine Erscheinung, die bei keiner anderen Kraft wahrgenommen wird.

Schon bei dem Überblick der organischen Verbindungen ist uns die Verwickeltheit, oder sagen wir rundweg Unnatürlichkeit mancher Strukturformeln aufgefallen. Einige solcher Fälle wollen wir hier betrachten.

Die Strukturformel sagt etwas über den Bau des Moleküls aus. Es kommt deshalb bei ihrer Aufstellung nicht nur darauf an, daß alle beteiligten Stoffe ihren Valenzen entsprechend in ihr miteinander verknüpft sind, sondern es muß in denjenigen Fällen, wo verschiedene Verknüpfungsarten möglich sind, eine gewählt werden, die den Tatsachen der Beobachtung am besten genügt. Die Strukturformel soll ein möglichst getreues Abbild aller Eigenschaften der Verbindung sein, und die verschiedenen Gruppierungen der Atome in den Formeln sollen wirklich deren Gruppierungen im Raume symbolisch andeuten. Wir haben gesehen, daß es eine große Anzahl von Körpern gibt, die, was Zahl und Art der Atome betrifft, genau übereinstimmen und doch verschiedene Eigenschaften haben; dies waren die sogenannten

isomeren Verbindungen. Auch diese verschiedenen Eigenschaften müssen aus der Formel ersichtlich sein. Derartige Anforderungen machen die Kompliziertheit mancher Strukturformeln, namentlich organischer Verbindungen, erklärlich und lassen auch erkennen, daß man in vielen Fällen die verwickeltere Form wählen muß, während es viel elegantere, mehr symmetrische Formeln für dieselbe Verbindung geben würde. Wir haben dies auf S. 493 an dem Beispiel Veilchenessenz gezeigt. In den allermeisten Fällen lassen sich solche Strukturformeln für vorhandene Verbindungen auch aufstellen, in wenigen Fällen aber versagen sie. Wir können deshalb wohl annehmen, daß diese Formeln im allgemeinen richtige Angaben für die wirklichen Lageverhältnisse geben. Einige besonders interessante Beispiele mögen dies erläutern.

Es gibt zwei Körper, die die relativ einfache Zusammensetzung C_2H_3N haben, das *Acetonitril* und das *Acetoisonitril*. Sie unterscheiden sich dadurch, daß in dem ersten das Stickstoffatom leichter durch ein anderes ersetzt werden kann, im zweiten dagegen ein Kohlenstoffatom leichter als die anderen ausscheidet. Dies muß durch die beiden Formeln ausgedrückt oder, mit anderen Worten, durch die Gruppierung der Atome zur Anschauung gebracht werden. Es geschieht, indem wir das Nitril $N \equiv C-CH_3$, dagegen das Isonitril $C \equiv N-CH_3$ schreiben. In dem einen Fall ist der Stickstoff dreiwertig angenommen und auswärts gestellt, im anderen fünfwertig und in die Mitte gerückt. Wie können wir uns diese *Gruppierungen durch körperliche Atome* vorstellen? Offenbar nur, indem wir annehmen, die Atome seien *Urkristalle, deren Flächen in irgend einem Zusammenhang mit ihren Valenzen stehen. Das Kohlenstoffatom mit seinen vier Valenzen entspricht demnach einem Tetraeder*, der einfachsten Körperfigur. Stickstoff kann drei oder fünf freie Flächen haben, Wasserstoff hat immer nur eine, würde also etwa eine *Halbkugel* darstellen. Bei dem einen Kohlenstoffatom können wir ohne weiteres alle vier Flächen ausfüllen, drei davon mit je einem Wasserstoffatom, wodurch der uns bereits mehrfach bekannte Methylkörper gebildet wird; an die vierte Fläche lagert sich beim Nitril das zweite C mit einer seiner Flächen, es hat also noch drei Flächen frei, an deren eine sich das N mit einer Fläche anlegt. Es bleiben also sowohl bei jenem C wie bei N je zwei Flächen frei, auf welche Angriffe anderer Atome stattfinden können, um sie aus ihrer Lagerung zu reißen. Aber wir sehen ohne weiteres, daß das N freier steht, leichter abzutrennen ist. Bei der Formel des Isonitrils ist das Umgekehrte der Fall. Hier steht das C außen und hat drei Flächen frei.

Nach den oben gegebenen Strukturformeln sättigen sich mehrere Valenzen von C und N untereinander. Daß dies wirklich geschieht, ist nicht zu beweisen und keineswegs wahrscheinlich. Man zählt deshalb solche Verbindungen zu den ungesättigten, und es würde ebenso den Tatsachen der Beobachtung entsprechen, wenn wir die Formeln etwa so schrieben: $\overset{|}{\underset{|}{N}}-\overset{|}{\underset{|}{C}}-CH_3$ und $-\overset{|}{\underset{|}{C}}-\overset{|}{\underset{||}{N}}-CH_3$, also mit freistehenden Valenzen, wie es unserer Flächenanschauung entspricht. In der Tat gelingt es unter passenden Voraussetzungen, diese freien Valenzen mit anderen Atomen zu sättigen.

Nicht immer sind indes alle Isomere, für die man eine Formel aufschreiben kann, auch in der Natur vorhanden oder darzustellen. Ein sehr frappantes Beispiel führt hierfür *Nernst* in seiner theoretischen Chemie an, die uns bei den gegenwärtigen Betrachtungen vielfach zur Grundlage dient. Das oben erwähnte Nitril wird zur Blausäure, CNH, wenn man ihm CH_2 nimmt, was bei der Form $C \equiv N-CH_3$ ohne weiteres geschehen kann, da sowohl H wie CH_3 einwertig ist, sie also einander vertreten können. Die Formel geht somit sonst unverändert in $C \equiv N-H$

über. Aus dieser Formel ist zu erkennen, daß die Blausäure sich leicht in C und das Radikal NH spalten lassen müßte. Dieses letztere gehört zu den Ammoniumradikalen (NH_3, NH_2 und NH), die den Stoffen, mit denen sie in Verbindung treten, ammoniakalische Eigenschaften geben; der vorliegende Stoff wäre also als ein Derivat des Ammoniaks anzusehen, was indes die Blausäure nicht ist, die aus dem Cyanradikal CN abgeleitet wird. Dieser Forderung entspricht besser die zweite mögliche Form der Struktur $N\equiv C-H$, denn bei ihr sind N und C fester, d. h. mit weniger ungesättigten Valenzen, gebunden. Immerhin ist es auffällig, daß es nur diese eine Blausäure gibt, während doch zwei Nitrile nach den beiden oben angeführten Formeln dargestellt wurden, und sich die beiden Formelpaare nur durch die Vertauschung von H gegen die Methylgruppe unterscheiden. Es ist in diesen und ähnlichen Fällen, die sich immer nur auf ungesättigte Verbindungen beziehen, wohl möglich, daß diese zu unbeständig sind, um beobachtet werden zu können.

Sehr interessante Gesichtspunkte eröffnet auch hier der Benzolring. Das Benzol hat die Zusammensetzung C_6H_6. Käme es auf weiter nichts an, als die Valenzen dieser zwölf Atome miteinander zu verbinden, so würde die sehr symmetrische Formel $H-C\equiv C-\overset{H}{\underset{H}{C}}-\overset{H}{\underset{H}{C}}-C\equiv C-H$ dieser Bedingung genügen. Dieser Stoff existiert in der Tat als sehr unbeständiger Kohlenwasserstoff der Fettreihe, Dipropargyl, der dem Aussehen der Formel einmal als offener Kette, dann als ungesättigter Verbindung entspricht. Das Benzol, in gleichen Proportionen aus C und H zusammengesetzt, ist aber ein wesentlich beständigerer Körper mit noch anderen Eigenschaften als denen jenes Fettkohlenwasserstoffs. Es mußte also noch eine andere Formel gefunden werden, in der keine dreifachen Bindungen erscheinen. Gleichzeitig forderten die Eigenschaften des Benzols, daß diese Formel noch viel symmetrischer sei als die angeführte, weil bei fast allen organischen Verbindungen sich die an Kohlenstoffatomen hängenden Wasserstoffatome durch die gleiche Zahl von Chloratomen ersetzen lassen, die ja auch einwertig sind. Tauschen wir beim Benzol ein H gegen ein Cl aus, so ließen sich, wenn die obige Formel richtig wäre, verschiedene Isomere denken, je nachdem das Chlor bei einem der Endglieder der Kette oder bei den in der Mitte stehenden C-Atomen eingefügt wird; denn in dem ersten Falle würde sich das Radikal ClC abspalten lassen, während im anderen das Cl-Atom viel fester sitzen müßte und jedenfalls nicht mit einem C zugleich zu entfernen wäre. Nun gibt es aber nur ein Phenylchlorid (C_6H_5Cl). Die Formel für das Benzol muß demnach so beschaffen sein, daß alle sechs H eine völlig gleichartige Stellung zu den sechs C haben. Diese Bedingungen waren durch solche Strukturformeln sehr schwer zu erfüllen, aber mit Hilfe des Benzolringes gelang es doch, und zwar in folgender Weise:

```
       H                  H
       |                  |
       C                  C
  H-C /  \ C-H      H-C /  \ C-Cl
  H-C \  / C-H      H-C \  / C-H
       C                  C
       |                  |
       H                  H
     Benzol          Phenylchlorid.
```

Die Erfindung des Benzolringes war deshalb ein außerordentlich genialer Gedanke Kekulés und hat umwälzend auf die gesamte Strukturchemie gewirkt.

In diesem Benzolring ist es in der Tat gleichgültig, wo man das Cl-Atom vertauscht, die Unsymmetrie bleibt immer die gleiche.

Ist aber einmal ein H in dem Ringe vertauscht, so ist es nicht mehr gleichgültig, an welcher Stelle des Ringes wir eine weitere Substitution eintreten lassen. Denn stehen die beiden neuen Gruppen im Ringe benachbart, so können sie sich leichter beeinflussen, als wenn sie getrennt sind. Aus diesem Grunde gibt es Ortho-, Meta- und Paraisomere, wie wir schon auf S. 490 angeführt haben. Auch diese Tatsache ist unmittelbar mit unserer Raumanschauung verständlich.

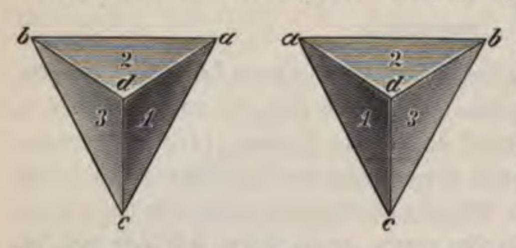
Es gibt aber noch einen sehr gewichtigen Grund für die tetraedrische Form des C-Atoms. Wir wissen, daß die Zusammensetzung des Methans (Sumpfgas) CH_4 ist, und wir bilden seine Strukturformel, indem wir die vier H kreuzweise um das C verteilen. Auch bei diesem Stoff ist es möglich, die H gegen Cl zu vertauschen. Ersetzen wir zwei H-Atome auf diese Weise, so sind offenbar bei der gewöhnlichen Schreibweise zwei solche isomere „Methylenchloride" möglich:

```
   H            H            H
   |            |            |
H—C—H       Cl—C—Cl      Cl—C—H
   |            |            |
   H            H            Cl
Methan          Methylenchlorid.
```

Bei dem einen sind die beiden Chloratome benachbart, beim anderen stehen sie sich gegenüber, woraus sich verschiedene Eigenschaften ergeben müßten. Es gibt aber nur ein Methylenchlorid. Unsere Raumanschauung erklärt dies sofort, da die vier Seiten eines Tetraeders einander alle gleich benachbart sind; sowohl je zwei Ecken wie die Mitten zweier Seiten sind gleichweit von den beiden anderen entfernt. Es wäre wirklich ganz widernatürlich, wie wir auch die Erscheinung der Valenzen entstanden denken mögen, anzunehmen, daß diese vier hervorragenden Punkte in einer Ebene liegen sollten. Denn alle diese Vorgänge geschehen im Raume, wir haben es also mit raumerfüllender Materie zu tun, und keine Wahrnehmung spricht dafür, daß diese chemischen Kräfte in nur einer Ebene wirken. Sie finden im Gegenteil immer in einem System von Ebenen statt, die sich zu Körpern, den Kristallen, zusammenschließen.

Die tetraedrische Form des C-Atoms geht auch noch aus einer anderen sehr merkwürdigen Eigenschaft seiner Verbindungen hervor, von der wir gleichfalls schon gesprochen haben. Wir nahmen nämlich wahr, daß solche Kohlenstoffverbindungen, bei denen jede der vier Valenzen mit einer verschiedenen Atomgruppe gesättigt ist, außer den etwa durch verschiedene Gruppierungen möglichen chemischen Isomeren noch optische Isomerie zeigen. Bei Erwähnung der Weinsäure auf S. 477 wurde hiervon gesprochen. Es gibt eine die Polarisationsebene des Lichtes rechtsdrehende „Rechtsweinsäure" und eine linksdrehende „Linksweinsäure" neben einer optisch indifferenten. Alle drei unterscheiden sich chemisch nicht voneinander. Läßt man die letztere Modifikation auskristallisieren, so erhält man die auf S. 477 abgebildeten beiden Formen dem regulären System angehörender Kristalle, die einander wie die rechte und die linke Hand oder wie ein Spiegelbild dem Objekt gleichen. Wir haben an der betreffenden Stelle schon angeführt, daß nach einer Auslese und Trennung der beiden verschiedenen Formen die Lösung der einen die rechtsdrehende, die der anderen die Linksweinsäure ergibt. Das in der Strukturformel $\begin{array}{l} H{-}C{<}^{OH}_{COOH} \\ \quad | \\ H{-}C{<}^{COOH}_{OH} \end{array}$ asymmetrische Kohlenstoffatom der Weinsäure zeigt wohl nach der Erfahrung diese optische Isomerie an, gibt aber keinerlei Auskunft darüber, wie sie entstehen konnte, da die Reihenfolge der nebeneinander stehenden Stoffe nicht geändert werden darf. Anders steht es mit dem tetraedrischen Kohlenstoffatom. Wir haben auf S. 518 zwei

Tetraeder nebeneinander gestellt und ihre drei sichtbaren Flächen, wie sie sich entsprechen, numeriert; die vierte ist auf der Ebene des Papiers liegend gedacht. Die Anordnung der Flächen macht beide Figuren zu Spiegelbildern, die durch keine Drehung so zur Deckung gebracht werden können, daß die gleichartigen Flächen übereinander liegen. Und doch sind in beiden die gleichen Flächen einander benachbart, die Bedingung gleichen chemischen Verhaltens also erfüllt. Stellen wir uns nun vor, daß die an diese vier Flächen gebundenen anderen Atome in jener Verbindung alle untereinander verschieden sind, so sehen wir, daß ein dadurch entstandenes Molekül nicht im Gleichgewichte sein kann, daß es auch im Sinne der Mechanik asymmetrisch ist; sein geometrischer Mittelpunkt fällt mit seinem Schwerpunkt nicht zusammen. Wenn nun ein solches Molekül durch irgend eine Ursache zur Drehung gebracht wird oder die Drehung anderer Teilchen bewirkt, wie es offenbar bei der Einwirkung solcher Stoffe auf die Wellen des Lichtäthers der Fall ist, so muß naturgemäß die Drehungsrichtung bei den beiden Modifikationen eine entgegengesetzte sein, weil die Lage des Schwerpunktes gegen den geometrischen Mittelpunkt in beiden Fällen entgegengesetzt ist. Die optischen Isomerien des Kohlenstoffs sind also durch die Annahme der tetraedrischen Form seines Atoms in überraschender und anschaulicher Weise erklärt.



Asymmetrische Flächenanordnung zweier Tetraeder.

Wir hatten als Grundform für die Uratome Kugeln angenommen, weil diese die Durchschnittsform aller denkbaren Körpergestalten ist. Es gehören nun mindestens vier Kugeln dazu, um einen Körper aus ihrer Zusammenlagerung zu bilden, der, von ebenen Flächen umgrenzt, einen Tetraeder darstellt. Sind mehr als vier Kugeln dazu verwendet, so muß ihre Anzahl doch immer durch vier teilbar sein, weil sich mehrere solcher Tetraeder zu größeren zusammenlegen. Ist aber das Atomgewicht der Elemente aus der Addition von gleichen Uratomen entstanden, so muß auch dieses beim Kohlenstoff durch vier teilbar sein, wie auch immer die angenommene Einheit sei; denn sie ist ja selbst immer wieder aus ganzen Zahlen der unbekannten letzten Einheit der Uratome zusammengesetzt. Dies trifft gleichfalls für den Kohlenstoff zu, dessen Atomgewicht 12 ist. Endlich kristallisiert er in einer Form des regulären Systems aus, die sich leicht aus Tetraedern zusammensetzen läßt.

Man hat diese erst in neuerer Zeit wieder häufiger aufgenommenen Versuche, die körperliche Lagerung der Atome in den Molekülen zu bestimmen, unter dem Namen einer Stereochemie zusammengefaßt. Ihre weitere Behandlung wird jedenfalls sehr fruchtbringend wirken.

6. Chemischer Zustand und Temperatur.

Ebenso wie alle physikalischen Vorgänge mit alleiniger Ausnahme der Schwerkraft von der Temperatur abhängig sind, unter der sie stattfinden, so sind es auch die chemischen. Temperaturänderungen bringen chemische Veränderungen hervor, wie umgekehrt durch chemische Vorgänge oft sehr bedeutende Wärmemengen den Stoffen zugeführt oder entzogen werden. Chemische Verbindungen sind aber nur innerhalb bestimmter Temperaturgrenzen möglich, zu tiefe Temperaturen machen die Materie träge, so daß Verbindungen entweder gar nicht mehr eintreten, oder die Reaktionen langsamer verlaufen. Bei zu hohen Temperaturen lösen sich

in der Regel mehr und mehr alle Verbindungen, sie „dissoziieren“ sich; die Materie kehrt in Formen zurück, die möglichst einfache oder gar keine Beziehungen zueinander haben. Auch die Aggregatzustände, die uns bisher nur vom physikalischen Standpunkt interessiert haben, sind durchaus von der chemischen Beschaffenheit der betreffenden Stoffe abhängig und demnach deren mit der Temperatur eintretende Funktionen, auf die wir nun näher eingehen.

a) Der gasförmige Zustand.

Obgleich es eine ganze Anzahl von chemischen Elementen und selbst Verbindungen gibt, die wir durch keine erreichbare Temperatur in den gasförmigen Zustand zu bringen vermögen, so geht doch aus allem hervor, daß dies nur an der Unzulänglichkeit unserer Hilfsmittel liegt. Je mehr wir die Wärmegrade steigern, desto mehr Stoffe sehen wir gasförmig werden, und desto mehr Verbindungen lösen sich in ihre Elemente auf. Das Spektroskop lehrt uns, daß auf der Sonne, deren Temperatur wahrscheinlich zwischen 6000 und 10,000° liegt, eine ganze Anzahl von Stoffen in Gasform vorhanden sind, die wir auf der Erde nicht verflüchtigen können, da die bei uns erzeugten Temperaturen nicht über 3—4000° hinausgehen.

Unsere bereits bei Untersuchung der physikalischen Vorgänge gemachten Erfahrungen über das Wesen der Wärme zwingen uns zu der Überzeugung, daß bei höheren Temperaturen zunächst der molekulare Zusammenhang und schließlich auch der der Atome in den Molekülen mehr und mehr gelockert wird, so daß zuerst die Moleküle unter sich, dann auch die Atome frei werden und sich wieder geradlinig fortschreitend bewegen. Wir müssen hier, ehe wir weitergehen, kurz zusammenfassen, was wir im physikalischen Abschnitte über diese Erscheinungen bereits ermittelt haben.

Alle diese Erfahrungen hatten schließlich ihren Grund in einer merkwürdigen Gleichartigkeit der physikalischen Wirkungen der verschiedenartigsten Gase. Wir leiteten zunächst das Boyle-Mariottesche Gesetz (S. 158) ab, nach welchem das Produkt aus Druck und Volumen eines Gases bei gleicher Temperatur immer eine Konstante ist, und das Gesetz von Gay-Lussac (S. 159) sagte uns, daß alle Gase sich bei gleicher Temperatursteigerung um eine bestimmte gleiche Größe ausdehnen. Hieraus folgte die Zahl von —273° als absoluter Nullpunkt der Temperatur (S. 156), bei dem alle Stoffe sich zu ihrer maximalen Dichte zusammengezogen haben müssen, also auch jede chemische Reaktion aufhört. Wir bestimmten den Wert der sogenannten Gaskonstanten R (S. 159), mit deren Hilfe wir im stande sind, alle Zustände aller Gase unter jedem Temperatur- und Druckverhältnis zu berechnen, abgesehen von gewissen Einschränkungen für extreme Daten, die sich als schöne Bestätigungen der auf dieser Beobachtungsgrundlage errichteten kinetischen Gastheorie (S. 156 u. f.) herausstellten.

In einem Gase fliegen die Moleküle mit großer Geschwindigkeit hin und her, die sich nach dem Temperaturgrade des Gases bemißt. Bei gleicher Temperatur ist also bei allen Gasen die lebendige Kraft, mit welcher die Moleküle bewegt werden, die gleiche, wie klein auch ihre Moleküle sein mögen. Der Druck, den das Gas gegen die Gefäßwände ausübt, hängt aber erstens von der Anzahl der Stöße dieser Moleküle, zweitens von ihrer Geschwindigkeit und drittens von ihrer Masse, d. h. ihrem Molekulargewicht, ab. Da bei gleicher Temperatur die lebendige Kraft der Moleküle für alle Gase die gleiche bleibt, so ist für diese der Druck nur noch von der Anzahl und dem Molekulargewicht abhängig, und da wir weiter die Dichte eines Gases gleich seinem Druck setzen können, so muß zwischen dieser, d, der Anzahl der wirkenden Moleküle, N, und ihrem Molekulargewicht, M, die einfache Beziehung $d = NM$ bestehen, also auch

für ein zweites Gas $d_1 = N_1 M_1$ und folglich $\frac{d}{d_1} = \frac{NM}{N_1 M_1}$. Wir können somit durch Bestimmung des Verhältnisses der Dichtigkeit eines Gases zu der eines anderen und der Molekulargewichte zueinander berechnen, *wieviel Moleküle von dem einen im Kubikzentimeter mehr enthalten sind als vom anderen.* Bei der experimentell mit aller Genauigkeit möglichen Ermittelung dieses Verhältnisses zeigt sich die außerordentlich wichtige Tatsache, daß *die Anzahl von Molekülen bei allen Gasen die gleiche ist, immer unter Voraussetzung gleicher Temperatur und gleichen äußeren Druckes.* Ob man also einen Kubikzentimeter des leichten Wasserstoffs oder des 16mal schwereren Sauerstoffs vor sich hat, immer bleibt die Zahl der darin vorhandenen Moleküle die gleiche; wir haben sogar (S. 117) angeben können, wie groß sie in abgerundeten *Billionen* aller Wahrscheinlichkeit nach ist. Freilich ist dafür der Druck des Sauerstoffs gegen die Gefäßwände auch 16mal größer als der des Wasserstoffs. Diese höchst einfache Beziehung, aus der alle die anderen einfachen Gasgesetze abgeleitet werden können, nennt man die *Avogadrosche Regel.*

Voltameterversuche
mit Salzsäure (a), Wasser (b) und Ammoniak (c) zur Bestimmung des Verhältnisses der Atomzahlen in den Molekülen.

Unter dieser Voraussetzung können wir aus der gemessenen Dichtigkeit der Gase, der sogenannten *Dampfdichte, ihr Molekular-, bez. Atomgewicht bestimmen*, und diese Methode ist am sichersten.

Wir haben eigentlich schon davon Gebrauch gemacht, als wir die *Zersetzung von Wasser durch den galvanischen Strom* eintreten ließen, um dadurch die spezifischen Gewichte der beiden beteiligten Elemente zu bestimmen (S. 385). Auf der einen Seite des *Voltameters* entstand dabei dem Volumen nach noch einmal soviel Wasserstoff als auf der andern Sauerstoff. Auf beiden Seiten sind gleiche Temperatur- und Druckverhältnisse; da aber im Wasser zwei Atome Wasserstoff auf ein Atom Sauerstoff kommen und alle Atome nach der Avogadroschen Regel auf beiden Seiten gleiche Abstände voneinander haben, so müssen die Wasserstoffatome hier noch einmal so zahlreich sein als Sauerstoffatome. Bei diesen Voltameterversuchen stehen demnach die Volumina der freiwerdenden Gase im Verhältnis ihrer Atomzahlen im Molekül. Verbinden wir also drei Voltameter, wie in der obenstehenden Zeichnung angegeben, durch denselben Strom und haben den einen mit Chlorwasserstoff, HCl, den anderen mit Wasser, H_2O, den dritten mit Ammoniak, NH_3, gefüllt, so werden in dem ersten gleiche Raumteile von H und Cl ausgeschieden, im zweiten doppelt soviel H wie O, im dritten dreimal soviel H wie N, was genau den chemischen Formeln der betreffenden Stoffe entspricht.

Diese freiwerdenden Gase *verbinden sich*, wie wir auf S. 430 u. ff. erfahren haben, mit einigen Ausnahmen *sofort wieder mit sich selbst*, indem immer zwei *Atome zu einem Molekül* zusammentreten. Dies folgt aus den Dampfdichtebestimmungen und anderweitigen Ermittelungen des Atomgewichtes. Es ist wohl zu unterscheiden, daß die Avogadrosche Regel in einem gleichen Raumteil eine gleiche Anzahl von Molekülen, aber nicht etwa von Atomen voraussetzt. Wir haben aber gesehen, daß ein Molekül aus hundert und mehr Atomen bestehen kann; um ebensoviel wird der Dampf eines solchen Stoffes dichter sein, als wenn sein

Molekül nur aus einem Atom bestände. Wenn also das Molekül des Ozons gegenüber dem zweiatomigen freien Sauerstoff aus drei O-Atomen besteht, so muß sich die Dampfdichte des Ozons gegen die des gewöhnlichen Sauerstoffs wie 3 zu 2 verhalten, was auch zutrifft, denn Ozon ist in diesem Verhältnis schwerer als Sauerstoff. Ist durch direktes Abwägen das kleinste Gewichtsverhältnis herausgefunden, unter dem ein Stoff in feste oder flüssige Verbindung mit anderen tritt, und sehen wir, daß derselbe Stoff im gasförmigen Zustand ein doppelt so großes Atomgewicht hat, wie es meist der Fall ist, so ist damit der Beweis der Zweiatomigkeit des Gasmoleküls gegeben.

Eine interessante Ausnahme bildet in dieser Hinsicht das auch sonst so merkwürdige Quecksilber, dessen Dampf sich als einatomig erweist, also nur halb so schwer ist, als man zu erwarten hätte. Auch die übrigen Metalle zeigen, soweit sie daraufhin untersucht werden konnten, diese Eigenschaft der Einatomigkeit im Dampfzustande.

Ebenso erweisen sich die neuentdeckten Gase Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon sämtlich als einatomig. Dies konnte freilich nur auf Umwegen erkannt werden, weil keiner dieser Stoffe eine Verbindung mit anderen eingeht, so daß man das Atomgewicht nur aus den Bestimmungen der Dampfdichte kennt. Dabei zeigt sich z. B., daß eine gleiche Raummenge Helium doppelt so schwer ist wie Wasserstoff. Wären beide Gase zweiatomig, so müßte man das Atomgewicht des Heliums gleich 2 annehmen. Nun gibt es aber noch eine rein physikalische Methode der Bestimmung des Molekulargewichts, die auf den in so vieler Hinsicht fruchtbaren Prinzipien der kinetischen Gastheorie beruht, und von der wir bereits einmal Gebrauch gemacht haben. Wir sahen nämlich (S. 197), daß die Schallgeschwindigkeit in Gasen gegenüber derjenigen, welche nur aus ihrer Elastizität folgen würde, einer Korrektion bedarf, die von der Wärmekapazität des betreffenden Gases abhängt. Diese ist wieder eine Funktion der Anzahl von Zusammenstößen der Moleküle unter sich und deren Gewicht bei der Fortpflanzung des Schalles. Die Korrektion wächst demnach bei gleicher Anzahl von Molekülen in der Raumeinheit mit deren Gewicht, und die Messung der Schallgeschwindigkeit gibt für sie ein Maß. Sie kann durch die Kundtschen Staubfiguren, von denen wir auf S. 143 sprachen, mit großer Genauigkeit für ein beliebiges Gas bestimmt werden, und es zeigt sich, daß die kleinsten Teile, welche im Helium den Schall übertragen, nicht zwei-, sondern viermal schwerer sind als ein Wasserstoffatom. Berücksichtigt man die oben angeführte Bestimmung der Dampfdichte, so folgt, daß das Heliumgas einatomig sein muß. Das Gleiche ergibt sich auch für die anderen oben angeführten, in der Luft neuentdeckten Gase. Sie verhalten sich chemisch vollkommen indifferent, aber gerade darum scheint es im Einklang mit ihrer scheinbaren Einatomigkeit zu stehen, wenn wir sie als sehr feste Verbindungen ansehen, die ganz gesättigt sind.

In Bezug auf das Helium sei hier eine Perspektive gestattet, die wieder nur vom Standpunkte des Astronomen aus möglich ist. Als das Helium noch nicht auf der Erde entdeckt, sondern nur durch die oft erwähnte Linie D_3 (S. 249) im Sonnenspektrum bekannt war, äußerte der Verfasser einmal die Überzeugung, daß dieser Stoff, auf der Erde aufgefunden, sich leichter als Wasserstoff erweisen würde, weil wir das Helium auf der Sonne nur in den höchsten Regionen ihrer Atmosphäre antreffen, während die Wasserstoffatmosphäre unmittelbar darunter liegt. Diese Vermutung hat sich nicht bestätigt; der Heliumdampf stellt sich als noch einmal so schwer wie der des Wasserstoffs heraus, wenn er sich damit auch immer noch als der leichteste Stoff nach jenem erwies. Würden wir aber annehmen, das Helium wäre

ein allotroper Zustand des Wasserstoffs, in dem das Molekül vier Atome H enthält, die sich bei sehr hohen Temperaturen alle vier voneinander trennen, dissoziieren, so wäre es dann nur noch halb so schwer wie der gewöhnliche Wasserstoff. Durch Abkühlung treten mehr und mehr je zwei Atome zu Molekülen zusammen, die durch ihre Schwere in die tieferen Schichten der Sonnenatmosphäre hinabfallen und dort jene „Chromosphäre" bilden, die zum größten Teil aus Wasserstoff, zum geringeren aber auch noch aus Helium besteht. Unter diesen Voraussetzungen müßte es, allerdings unter schwer möglichen Verhältnissen, vielleicht bei sehr niederen Temperaturen und hohem Druck gelingen, aus zwei Wasserstoffmolekülen ein Heliumatom zu bilden, das dann gewissermaßen eine übersättigte Allotropie des Wasserstoffs darstellt und keine anderen Verbindungen mehr eingeht.

Da wir einmal bei solchen, jedenfalls interessanten astronomisch-chemischen Spekulationen sind, so möge noch eine andere hier Platz finden. Eine Ordnung der Liste der Elemente, die bis jetzt auf der Sonne entdeckt worden sind, nach ihren Atomgewichten, bringt bis zum Atomgewichte 165, dem des Erbium, alle bekannten Stoffe mit folgenden Ausnahmen: Zunächst fehlen alle Nichtmetalle außer Kohlenstoff, Wasserstoff und Silicium. Dies erklärt sich ohne weiteres durch die allein mögliche spektroskopische Entdeckungsmethode, denn es zeigt sich, daß die Spektren dieser Stoffe gegen die Metallspektren immer stark zurücktreten und demnach sehr schwer zu sehen sind. Nur die Spektren von Wasserstoff und Silicium erscheinen deutlich neben Metallspektren, weshalb sie auch auf der Sonne gefunden wurden. Auch die Auffindung des Kohlenstoffspektrums ist erst in neuerer Zeit gelungen. Das Fehlen der Spektren der Metalloide beweist also nicht das Fehlen der Stoffe in der Sonne. Ferner fehlen die seltenen Stoffe Gallium, Rubidium, Ruthenium, Palladium, Indium, Cäsium, Didymium, Samarium und Gadolinium. Unter der gewiß erlaubten Voraussetzung, daß diese Elemente auch auf der Sonne selten und darum schwer zu entdecken sind, kann deren Fehlen nicht auffallen. Dagegen bricht nun beim Atomgewicht 165 die Liste der Sonnenelemente plötzlich ab, mit den beiden Ausnahmen von Blei und Uran. Das Spektrum des letzteren ist nur sehr unsicher erkannt, wogegen das Auftreten des schweren Bleis eine Erklärung verlangt. Daß die übrigen schweren Elemente — es gibt deren noch dreizehn und zum Teil keineswegs so sehr seltene, wie Platin, Gold, Quecksilber, Wismut — im Spektroskop nicht vorkommen, erklärt sich aus ihrer tieferen Lage in den Schichten der Sonnenatmosphäre, in denen wir sie nicht mehr erreichen können. Das Blei würde aus dieser Ausnahmestellung treten, wenn es im gasförmigen Zustand ebenso wie das Quecksilber halb so schwer sich erwiese, als sein bisheriges Atomgewicht vermuten läßt, es also gleichfalls ein einatomiges Gas bildete, das auf der Sonne noch als etwas leichter als der dort beobachtete Silberdampf zur Erscheinung käme. Die Dampfdichten der Schwermetalle mit Ausnahme der des Quecksilbers und Kadmiums haben sich bisher nicht bestimmen lassen, weil sie ja meist kaum schmelzbar, geschweige denn zu verflüchtigen sind. Bildet also Blei wirklich ein einatomiges Gas, so gewinnt es dadurch eine Ähnlichkeit mehr mit dem Quecksilber, dem es sich wegen seiner verhältnismäßig sehr leichten Schmelzbarkeit bei hohem Atomgewicht und auch noch in anderen chemischen Eigenschaften nähert.

Sind diese hypothetischen Kombinationen richtig, so fällt es anderseits wieder auf, daß man das Spektrum des Quecksilbers auf der Sonne nicht zu entdecken vermag, obgleich es eine große Menge auffälliger Linien hat und in Dampfform unter den gestellten Voraussetzungen noch etwas leichter als Bleidampf ist. Wir kommen erst in vollständige Übereinstimmung mit den Tatsachen der Solarspektroskopie, wenn wir die weiteren Annahmen machen, daß

überhaupt alle Dämpfe der schweren Sonnenmetalle einatomig sind wie das Quecksilber und das Kadmium. Dieses Metall ist etwas schwerer als Silber, aber leichter als Blei schmelzbar, so daß auch seine Dampfdichte bestimmt werden konnte. Sind auf der Sonne etwa, von der Bleigruppe angefangen, die Schwermetalle überhaupt einatomig, so rücken sie als Dämpfe in die Klasse der Leichtmetalle hinauf, und der Bleidampf würde auf der Sonne mit dem Atomgewicht 103 die Reihe der dort vorkommenden Stoffe abschließen. In der Tat haben in neuester Zeit rein chemische Untersuchungen es fast sicher gemacht, daß alle Metalldämpfe einatomig sind.

Diese astronomisch-chemischen Ausblicke haben einen ganz besonderen Reiz. Sie zeigen, wie außerordentlich unser Wissen sich heute verzweigt hat, und wie man, um alle Argumente für den Fortschritt eines Gebietes zusammenzufassen, aus jeder Richtung die Quellen der Erfahrungen zusammenströmen lassen muß. In die völlige Unmöglichkeit versetzt, alle diese Gebiete zu beherrschen, muß für den Einzelnen die Aufstellung von Hypothesen, mögen diese auch zunächst etwas kühn erscheinen, notwendig fruchtbringend wirken, indem sie Gesichtspunkte eröffnen, die den Spezialforschern von ganz fernstehender Seite her Winke geben, mag auch bei der notwendigen experimentellen Prüfung manche jener Ideen sich als unzutreffend erweisen.

Auch der Joddampf kann einatomig werden, und die Umstände, unter denen dies geschieht, werfen auf unsere vorangegangenen Betrachtungen über die Einatomigkeit der anderen angeführten Elemente ein interessantes Licht. Jod verdampft bei 176°. Bei Temperaturen, die nicht wesentlich darüber liegen, verhält sich sein Dampf ganz normal und ist namentlich auch zweiatomig. Bei steigender Temperatur folgt er aber dem Mariotteschen Gesetze nicht mehr, nach dem sich bekanntlich ein Gas in ganz gleichmäßiger Weise entsprechend der „Gaskonstanten" mit der Temperatur ausdehnen soll. Joddampf dehnt sich aber bis zu einer bestimmten Temperatur schneller aus als die anderen Gase, um sich dann wieder dem allgemeinen Gesetze zu fügen. Dies ist eine Folge der Dissoziation seines doppelatomigen Moleküls J_2 in $J+J$. Die Anzahl der dissoziierten Atome, die sich unter die Doppelatome mischen, schreitet mit der Temperatur fort, und da jedes der getrennten Atome J denselben Raum beansprucht wie vorher das Molekül J_2, so muß die Dampfdichte beständig abnehmen, bis alle Moleküle gespalten sind, bis also die Dampfdichte den halben Wert von der anfänglichen hat. Dann wird der Dampf wieder dem Gasgesetze folgen. Die Messungen bestätigen diese Erklärung jener auffälligen Abweichung von einem sonst so allgemein befolgten Gesetze. Diese Spaltung der Moleküle in ihre Atome ist zweifellos eine Folge der steigenden Temperatur.

Aber der Einfluß der Temperatur auf die Dissoziations-, bez. Verbindungserscheinungen in Gasen ist kein einfacher, wie wir auch aus unseren Grundanschauungen leicht verstehen. In der Nähe des absoluten Nullpunktes ist weder eine Verbindung noch eine Lösung mehr möglich, oder beide Erscheinungen verlaufen nur sehr träge. Bei steigender Temperatur wird zunächst die Verbindungsfähigkeit größer wegen der zunehmenden Beweglichkeit der kleinsten Teile, die sich deshalb leichter finden können. Wird dagegen bei weiter zunehmender Temperatur die Geschwindigkeit der im Gaszustand frei beweglichen Moleküle eine zu große, so werden ihre gegenseitigen Zusammenstöße so kräftig, daß der oft nur auf einem recht labilen Gleichgewicht aufgebaute Zusammenhang der Atome in den Molekülen, der bei vielen Explosionsstoffen geradezu wie der Bau eines Kartenhauses erscheint, zerrissen wird. Je größer die Moleküle sind, desto kräftiger muß der Anprall wirken, wegen ihres größeren Trägheitsmomentes; bei wachsender Temperatur herrscht also von einem gewissen

Punkt an das Bestreben, immer kleinere Ansammlungen von Atomen, also immer einfachere Verbindungen übrigzulassen, bis die zweiatomigen Moleküle der vergasten Elemente schließlich auch noch in einatomige zerfallen.

In dieser Hinsicht zeigt der Schwefeldampf ein eigentümliches, von Riecke eingehend studiertes Verhalten. Die Dampfdichte dieses Elementes nahm ebenso, wie wir es schon beim Jod sahen, mit erhöhter Temperatur erheblich ab; ihr Wert entspricht aber in der Nähe des Siedepunktes nicht einem zweiatomigen Molekül, sondern einem viel größeren. Riecke nimmt dafür S_8 an. Bei steigender Temperatur spaltet es sich, wahrscheinlich zunächst in $S_6 + S_2$, wodurch die Dampfdichte entsprechend abnimmt. Von den sechsatomigen Molekülen spalten sich dann bei zunehmender Temperatur immer mehr zweiatomige Moleküle ab, bis bei hoher Temperatur der Endzustand erreicht wird und alle Moleküle zweiatomig sind. Wir sehen hier, wie die Materie gewissermaßen noch im gasförmigen Zustand eine Art Schmelzprozeß erleidet, indem die beim Sieden aus dem flüssigen Verbande losgelösten Teilchen immer kleiner werden, damit sich die Materie allmählich auf einen immer größeren Raum ausdehnen kann.

Nach allen diesen Erfahrungen ist es kaum zweifelhaft, daß es nur einer genügend hohen Temperatur bedarf, um die Gase aller Elemente einatomig zu machen, und daß also unsere Vermutungen über ihren Zustand auf der Sonne durchaus begründet sind. Geben wir nach unseren früheren Betrachtungen zu, daß auch diese Atome noch spaltbar sind, so würden wir auf Weltkörpern, deren Temperatur noch wesentlich höher ist als die unserer Sonne, chemische Zustände voraussetzen müssen, für die uns vorläufig noch jede Erfahrung fehlt. Es ist aber kein Zweifel, daß unsere Sonne nicht zu den heißesten Weltkörpern zählt. Ihr Licht ist bereits gelblich, während es völlig weiße und sogar bläuliche Sterne gibt, deren ganzer Spektralcharakter für sehr hohe, dort herrschende Temperaturen spricht. (Man vergleiche deswegen des Verfassers „Weltgebäude“, S. 331.)

Die Mischung zweier Gase, deren Atome an sich eine sehr starke Verwandtschaft zueinander haben, wie z. B. Sauerstoff und Wasserstoff, läßt doch ohne weiteres keine Vereinigung derselben stattfinden; wir müssen das Gemisch zuvor, wenn auch an einer noch so kleinen Stelle, auf eine ganz bestimmte Temperatur bringen, worauf dann zuweilen, wie im oft herangezogenen Beispiel von H und O, die Verbindung unter heftiger Explosion stattfindet. In anderen Fällen, wie bei den festen Explosivstoffen, ist die Anfangswärme nötig, um im Gegenteil den Zerfall der meist in solchen Fällen äußerst künstlich aufgebauten Moleküle zu bewirken. Wie können wir uns diese scheinbar entgegengesetzte Wirkungsweise der Temperatur erklären?

Die Explosion fester Körper, die auf einem plötzlichen Zerfall ihrer Moleküle beruht, stellen wir uns nach dem Vorangegangenen wohl vor. Diese Explosivkörper sind meistens komplizierte Kohlenstoffverbindungen, die wegen der chemischen Vielseitigkeit und Trägheit des Kohlenstoffs oft äußerst „kippelig“, um uns eines vulgären, aber sehr bezeichnenden Ausdrucks zu bedienen, aufgebaut sind, wie auch die Jongleure die verschiedenartigsten Dinge im haarscharfen labilen Gleichgewicht aufeinander zu türmen verstehen. Wird durch Temperaturerhöhung oder durch mechanische Erschütterung, also Stoß, auch nur eins dieser Moleküle zertrümmert, so reißt es notwendig alle umliegenden mit, weil seine befreiten Atome nach dem Gesetze von Avogadro sich auf einen meist mehr als tausendfach größeren Raum ausdehnen und dadurch einen weit heftigeren Stoß auf die umgebenden Moleküle üben, als jener war, der das erste zertrümmerte. Die Explosion breitet sich darum mit ungeheurer Geschwindigkeit aus, welche die des Schalles in den betreffenden Gasen bei weitem übertrifft. Bei der

Explosion von Gasgemischen ist diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit im ganzen gleich, wie auch die chemische Zusammensetzung sein möge: wir treffen auch hier wieder auf dieselbe Gleichartigkeit, die wir bei den Gasen überhaupt als eine Folge des Gasgesetzes überall erkennen. Diese Geschwindigkeit liegt nach Messungen von Berthelot und Dixon, die sich in wahrhaft bewundernswürdiger Weise mit diesen höchst gefährlichen Versuchen mit heftigsten Explosionskörpern eingehend beschäftigt haben, zwischen 2500 und 2800 m in der Sekunde. Bei festen Stoffen wird sie noch wesentlich größer, bei Nitromannit ist sie zu der ungeheuern Zahl von 7700 m angewachsen; das wäre nahezu genügend, um einen mit dieser Geschwindigkeit geschleuderten Körper dauernd aus dem Bereiche der irdischen Schwerkraft zu entfernen, d. h. andere Weltkörper von der Erde aus zu bombardieren. Für Pikrinsäure wurden 6500 m, für Schießbaumwolle 5400 m gefunden, für Dynamit 2500 m. Der Druck, den diese Stoffe bei der Befreiung ihrer Atome auf die Gefäßwände ausüben, wenn sie im geschlossenen Raume zur Explosion gebracht werden, beträgt nicht weniger als etwa 10,000 kg auf den Quadratzentimeter. Es ist klar, daß kein irdischer Stoff dieser Gewalt zu widerstehen vermag, mit der die befreiten Atome den ihnen vom Gasgesetz vorgeschriebenen Raum einnehmen, und dies gibt gleichzeitig eine Illustration dafür, welche unendliche Fülle von Kraft in den freien Atomen steckt, die die letzte Ursache aller Vorgänge in der Natur sind.

Im Wesen gleichartig mit diesen Explosionserscheinungen sind die der Verbrennung. Bei ihr treten nur alle Vorgänge langsamer auf, weil die Verbindungen, um welche es sich hier handelt, weniger labil aufgebaut sind und deshalb langsamer zerfallen, ferner auch, weil die größere Einfachheit der molekularen Zusammensetzung eine geringere Volumenvergrößerung beim Zerfall bedingt. Immerhin bedarf es auch hier einer gewissen Entzündungswärme, um den Prozeß einzuleiten, der sich dann ebenso wie bei den Explosionen von Molekül zu Molekül fortpflanzt, aber bei einer bestimmten Temperatur eine Grenze findet, die durch die äußere Temperatur, die entstehende Verbrennungswärme und den Siedepunkt der Verbindung bedingt ist.

In beiden Fällen, bei der Explosion wie bei der langsameren Verbrennung, wird eine gewisse Wärmemenge frei, die mit den Atomen vorher gebunden war. Hierauf beruht der Nutzwert der Verbrennungsprozesse. Ein Kilo Holz entwickelt z. B. etwa 4000 Kalorien bei seiner vollständigen Verbrennung. Da diese langsam geschieht, so kann man die freiwerdende Wärme leicht auf umgebende Gegenstände überführen, man kann damit heizen. Bei den Explosionen wird ganz wesentlich mehr Wärme entwickelt; jedes Gramm Nitromannit macht bei seinem Zerfall 1400 Kalorien frei, also 350mal mehr als bei der Verbrennung von Holz. Aber diese Wärmemengen verbreiten sich plötzlich auf einen sehr großen Raum und können darum nicht verwertet werden; nur die mit ihr verbundene Ausdehnungskraft wird benutzt.

Wie in allen Fällen etwas leichter zertrümmert wird, als es wieder aufzubauen ist, so gibt es eine große Menge von Verbindungen, namentlich die explosiven, die auf demselben Wege rückschreitend nicht wieder hergestellt werden können. Bei den eigentlichen, durch die Wärme allein erzeugten Dissoziationen ist dies aber der Fall. Die durch Wärmezufuhr zerspaltenen Jodmoleküle bilden sich aus den Atomen wieder, wenn man dem Gase Wärme entzieht, und das Gleiche tritt bei den meisten ähnlichen Zerspaltungen von Molekülen ein, bei denen der Zerfall mit der Wärmezufuhr Schritt hält. Bei den Explosionen gibt die Entzündungswärme nur den ersten Anstoß. Der Zerfall tritt nicht etwa infolge der Energiezufuhr ein, die der Temperaturerhöhung bis zur Entzündung entspricht, denn der ungeheure Energievorrat, der bei der

Explosion frei wird, ist auf anderem Weg als durch Wärmeeinwirkung angesammelt worden und kann darum durch Wärmezufuhr auch nicht wieder gebunden werden.

Ganz andere Verhältnisse treffen wir dagegen bei denjenigen Explosionen oder stürmischen Verbrennungen an, die auf einer Verbindung, nicht auf einem Zerfall einer solchen beruhen, z. B. bei der Verpuffung des Knallgases. Die große Affinität des Sauerstoffs zu fast allen anderen Elementen beginnt erst kräftig von einer gewissen Temperatur (Entzündungs- oder Oxydationswärme) an hervorzutreten, die für die verschiedenen Stoffe verschieden ist, aber in den meisten Fällen über der gewöhnlich herrschenden Temperatur liegt. Nur wenige Stoffe, der Phosphor zum Beispiel, entzünden sich von selbst. Die Notwendigkeit einer den Prozeß einleitenden Wärmezufuhr hat ihren inneren Grund offenbar darin, daß die betreffenden Moleküle eine gewisse Bewegungsenergie haben müssen, um durch ihren Zusammenstoß die zweiatomigen Gasatome zunächst auseinanderzuspalten; denn nur diese einzelnen Atome gehen ja andere Verbindungen ein, nur sie haben die nötigen freien Valenzen. Diese Spaltung braucht nur bei wenigen Molekülen einzutreten, weil sie dann die für die Fortpflanzung des Vorganges nötige Wärme wie bei den besprochenen Explosionsvorgängen selbst erzeugen. Nun erst verbinden sich O und H im Knallgas mit jener bekannten Heftigkeit zu Wasser. Die Temperatur, unter welcher es explodiert, hat demnach eine obere Grenze, die der Dissoziationstemperatur dieser Gase. So zersetzt sich im andern Fall Wasser, welches man über glühende Stahlplatten fließen läßt, in Knallgas. Auf der Sonne befinden sich beide Gase in sehr heißem Zustand nebeneinander. Würde man stark erhitztes Knallgas sehr langsam abkühlen, so könnte sich nur sehr langsam seine Verbindung zu Wasser herstellen. Es wäre deshalb falsch, anzunehmen, daß bei dem Abkühlungsprozeß der Weltkörper, auf denen vorher jene beiden Elemente in Gasform nebeneinander bestanden, die Bildung des Wassers katastrophenartig stattgefunden hätte.

Auffällig wird die starke Herabminderung der Reaktionsfähigkeit des Sauerstoffs bei Temperaturerniedrigung durch folgendes, zuerst von Raoul Pictet gezeigtes Experiment. Es wurde erwähnt (S. 428), daß Natrium, auf Wasser geworfen, sich heftig entzündet. Seine Verwandtschaft zum Sauerstoff ist größer als die des Wasserstoffs, den er aus der ungemein festen Verbindung des Wassers vertreibt. Diese Reaktion gehört zu den wenigen Oxydationsprozessen, die bei gewöhnlicher Temperatur schnell verlaufen. Weniger heftig ist die Reaktion, wenn man dem Wasser Alkohol zusetzt, der, mit Wasser vermischt, bei -80^{0} noch flüssig erhalten werden kann. Wenn man aber bei dieser Temperatur in ihn Natrium wirft, so bleibt es völlig teilnahmlos darin liegen. Erst bei langsamer Steigerung der Temperatur sieht man einige Blasen freiwerdenden Wasserstoffs aufsteigen, der nun erst durch das Natrium aus dem Wasser verdrängt wird; die Reaktion beginnt also ganz langsam. Wir haben hier einen sehr augenfälligen Beweis von dem großen Einfluß der Temperatur auf die Reaktionsfähigkeit der chemischen Stoffe.

Es ist indes kaum zweifelhaft, daß durch den Einfluß der Temperatur das Wesen der Verwandtschaft der Stoffe zueinander nicht verändert wird, sondern nur die Schnelligkeit der Reaktion. Die Temperatur beschleunigt unter einem System verschiedenartiger Atome oder Moleküle die Herstellung des Gleichgewichtes, das aber zuweilen durch eine neue Verbindung, unter anderen Umständen auch durch ihre Trennung, also durch eine Dissoziation, herbeigeführt werden kann. Mischt man H und O unter gewöhnlicher Temperatur, so findet nur scheinbar keine Einwirkung beider Stoffe aufeinander statt; in Wirklichkeit bildet sich auch dabei Wasser, aber nur ungemein langsam, so daß die Reaktion, welche bei erhöhter Temperatur in einem

Bruchteil einer Sekunde geschieht, nun wahrscheinlich Jahrhunderte braucht. Genauer ist diese Eigenschaft von Hautefeuille und Lemoine an einem Gemisch von Wasserstoff und Jod beobachtet worden. Unter gewöhnlicher Temperatur verbinden sich diese Elemente scheinbar gar nicht. Bei etwa 250° dauerte es Monate, bis sich aus $H_2 + J_2$ die Verbindung $2HJ$ gebildet hatte, bei 350° war der Umbau in wenigen Tagen, bei 450° in wenigen Stunden vollzogen, und bei noch höheren Temperaturen geschah sie entsprechend schneller bis zu stürmischer Vereinigung.

Wir können diese Wahrnehmung sehr gut begreifen, denn die Art der Verwandtschaft zwischen den Stoffen ist nach unserer Anschauung eine Folge ihrer Körperbeschaffenheit (Größe der Moleküle, Anzahl der Valenzen), der Grad der Betätigung dieser Verwandtschaft aber eine Folge der Geschwindigkeit der kleinsten Teile, mit der sie einander finden können, also der Temperatur; durch die Beobachtung finden wir dies bestätigt. Aber auch bei gewöhnlicher Temperatur finden noch immer sehr viele Zusammenstöße der Moleküle untereinander statt, die notwendig zu Vereinigungen führen müssen, wenn die Art der Moleküle selbst dazu geeignet ist; nur werden sie um so seltener und schwächer, je niedriger diese Temperatur ist.

Also auch in jenen fernen Nebelflecken des Himmels, wo Wasserstoff, Stickstoff und ein noch unbekanntes Gas ungeheure Räume einnehmen, werden sich ihre kleinsten Teile finden und zu neuen Verbindungen verdichten, welche Temperatur dort auch herrschen mag. Der von ihnen eingenommene Raum verkleinert sich dadurch nach der Avogadroschen Regel, und diese bestimmt demnach die Ursache des ersten Fortschrittes auf der Stufenleiter der Weltbildung. Nach unserer Anschauung ist aber der furchtbare Zusammenstoß zweier Weltkörper, den wir beim Aufleuchten neuer Sterne eintretend denken, im Prinzip durchaus nichts anderes, auch wenn, nach der Ansicht Seeligers, ein größerer Körper in eine Wolke kleinerer schlägt, die er mit sich dabei vereinigt. Immer ist an Stelle mehrerer kleiner ein größerer Körper getreten; es hat eine Verbindung der Materie wie bei allen chemischen Verbindungen stattgefunden, und Wärme ist hier wie dort entwickelt worden.

Auffällig ist es, daß fast alle neuen Sterne in der Nähe der Milchstraße erscheinen, wo sich die anderen Sterne besonders dicht zusammendrängen. Bei der Annahme, daß dies Erscheinen durch Zusammenstöße bewirkt wird, erklärt sich die räumliche Verteilung ohne weiteres. Ebenso müssen in dichteren chemischen Stoffen die Zusammenstöße häufiger, muß die Verbindungsgeschwindigkeit größer sein als in einem weniger dichten. Mit erhöhter Verdichtung, erhöhtem Druck, steigert sich demnach die Reaktionsfähigkeit der Gase und wird am größten in den Flüssigkeiten, in die wir die Gase ja von einer gewissen kritischen Temperatur an durch Druck verwandeln können.

An diese Stelle ordnet sich am besten eine ganz eigentümliche Gruppe von Erscheinungen, die namentlich bei den chemischen Vorgängen im lebenden Körper die allerwichtigste Rolle spielt, in ihrem Wesen aber noch wenig aufgeklärt ist. Man faßt sie als Katalyse zusammen. Erst in jüngerer Zeit ist ihre Bedeutung tiefer erkannt worden, und namentlich Ostwald in Leipzig, eine hervorragende Kapazität auf dem Gebiete der theoretischen Chemie, und eine Anzahl jüngerer Mitarbeiter befaßten sich mit diesen merkwürdigen Vorgängen. Einem von Ostwald auf der Hamburger Naturforscherversammlung von 1901 gehaltenen Vortrag entnehmen wir hierüber im wesentlichen das Folgende:

Unter Katalyse versteht man im allgemeinen alle Wirkungen, welche eine chemische, nicht physikalische Erscheinung, wie etwa den Kristallisationsprozeß, durch ihre bloße Gegenwart

beschleunigen, ohne daß von ihnen im Endprodukt der Umwandlung etwas verwendet oder verändert worden ist.

In diesem Sinn ist es bereits als ein katalytischer Prozeß zu bezeichnen, daß eine übersättigte Lösung mit großer Schnelligkeit auskristallisiert, wenn man eine ganz geringe Menge des betreffenden gleichen Stoffes in festem Zustand, oder nur einer „isomorphen“ Substanz, der Lösung hinzufügt. Ostwald konstatierte, daß bis zu einem Billionstel Gramm oft genügen, um diese Wirkung auszulösen. Dagegen bleiben selbst große Mengen eines verschieden kristallisierenden Stoffes unwirksam. Es ist also das charakteristische Merkmal der katalytischen Erscheinungen, daß die wirksamen Mengen in gar keinem Verhältnis zu den von ihnen erzeugten Wirkungen stehen. Hier, wie überall in der Natur, gilt der Satz, daß Gleiches sich zu Gleichem gesellt. Es ist wahrscheinlich, daß im lebenden Körper an bestimmten Stellen immer nur die gleichen Stoffe aus einem Gemisch abgeschieden werden, und zwar an verschiedenen Stellen auch verschiedene Stoffe, entsprechend den dort schon vorher vorhandenen; aus gleichen Keimen entstehen also immer nur gleiche Wesen.

Zu den katalytischen Erscheinungen gehört auch die Explosion von Gemischen, die durch Wärmezufuhr nur gerade eingeleitet werden, wie die des Knallgases, welche uns schon so oft beschäftigt hat. Es muß aber hervorgehoben werden, daß diese und alle anderen katalytischen Erscheinungen theoretisch immer nur als Beschleunigungen von Prozessen angesehen werden können, die auch ohne die Gegenwart des Katalysators, doch vielleicht erst nach unabsehbaren Zeitspannen, stattfinden würden.

Solche Verbrennungserscheinungen werden bekanntlich auch von Stoffen hervorgerufen, die im stande sind, Gase stark anzuziehen und zu verdichten, wie der Platinschwamm, oder noch besser das sogenannte „kolloidale Platin“. Dies führt uns zu der Vermutung, daß bei vielen katalytischen Erscheinungen, die bei bloßer Gegenwart eines dritten Stoffes eine Verbindung oder auch Trennung zweier anderen Stoffe hervorrufen, diese Stoffe nach und nach durch jenen dritten geleitet und in ihm entsprechend verdichtet werden. Die Schwefelsäure bildet sich auf diese Weise aus der schwefligen Säure unter Gegenwart des Luftsauerstoffs. Man nimmt an, daß bei solchen Prozessen Zwischenprodukte entstehen, die jene katalytischen Eigenschaften haben, sich aber sofort wieder zurückbilden.

Die interessanteste und wichtigste Gruppe von Katalysatoren bilden die sogenannten Enzyme, die Gärungserreger, ohne die kaum ein chemischer Prozeß im lebendigen Körper vor sich geht. Bei der Verdauung und den verschiedenen Aufgaben des Blutes vermitteln sie allein alle chemischen Umsetzungen. Der im tierischen Körper notwendige Verbrennungsprozeß, der die Energiemengen für diese verschiedenen physiologischen Maschinen zu liefern hat, würde auf gewöhnlichem chemischen Wege gar nicht oder doch nur äußerst langsam vor sich gehen können, weil der Sauerstoff bei der uns umgebenden Temperatur oder der des tierischen Körpers nur sehr träge mit anderen Stoffen sich verbindet. Die beschleunigende Wirkung der Enzyme ist darum das eigentliche Geheimnis der Lebensvorgänge, die das zukünftige Studium dieser katalytischen Erscheinungen aufzudecken verspricht.

Auch in der Technologie wird der Katalyse eine sehr wichtige Rolle einstmals zuzuweisen sein, da, wie Ostwald treffend bemerkte, auch hier Zeit Geld ist, also diese ohne Energiezufuhr von außen her bewirkte Beschleunigung der chemischen Prozesse eine wesentliche Ersparnis bedeutet. In einzelnen Fällen, z. B. bei der künstlichen Bereitung des Indigos, hat die Ausnutzung dieser Vorgänge zu einem großen Erfolg der deutschen technischen Chemie geführt.

Schon in unserem Kapitel über die Wärme (S. 172) haben wir gesehen, daß das Gasgesetz bei hohen Drucken versagt, so daß es dann gewisser Korrektionen bedarf, die van der Waals aufgestellt hat, und die bei näherem Hinblick eben jene Anschauungen glänzend bestätigen, die zu dem so wertvollen Gasgesetze selbst führten. Wir gehen deshalb hier etwas näher darauf ein.

Das unkorrigierte Gasgesetz drückt sich bekanntlich durch die einfache Formel $pv = RT$ aus, in der p der Druck, v das Volumen, T die absolute Temperatur des Gases und R die häufig erwähnte Gaskonstante ist. Bei der Aufstellung dieser Formel wurde vorausgesetzt, daß den hin und her schwingenden Molekülen der ganze Raum des Gefäßes, in dem das Gas eingeschlossen ist, zur Verfügung steht. Diese Voraussetzung trifft nur zu, wenn wir den Raum, welchen die Gesamtzahl der Moleküle körperlich in dem gegebenen Volumen ausfüllt, als sehr klein im Verhältnis zur Größe des Gefäßes annehmen. Je mehr Moleküle durch erhöhten Druck in diesem Volumen eingeschlossen werden, desto größer wird das Verhältnis ihrer Gesamtmasse zu dem ihnen zur Verfügung stehenden freien Raume. Die Anzahl der Zusammenstöße muß also mehr wachsen, als es die Volumenverminderung theoretisch voraussetzen läßt, und diese besondere Drucksteigerung (der Druck selbst ist ja eine direkte Folge der Anzahl der Stöße gegen die Gefäßwände) muß demnach im Verhältnis zu der Größe der Moleküle selbst stehen, weil ihre Raumverdrängung in dem Gefäß eben jene Steigerung des Druckes bewirkt. Van der Waals führte deshalb zunächst eine Korrektion b ein, die direkt von dem Molekularvolumen abhängt. Es kommt aber noch ein zweiter Umstand hinzu. Bei den unter gewöhnlichem Druck stehenden Gasen konnten wir voraussetzen, daß ihre Moleküle sich nicht gegenseitig beeinflußten, insbesondere keine Anziehungskraft aufeinander üben, weil ihr Abstand dazu ein zu großer ist. Dies trifft aber bei größerer Annäherung, also höherem Druck, nicht mehr zu. Es mußte also noch ein weiteres Korrektionsglied a eingeführt werden, das dieser Anziehung Rechnung trägt. Dieses Glied wirkt aber im umgekehrten Sinne wie das vorige, weil die innere Anziehung die Freiheit der Moleküle, also ihre Druckkräfte gegen die Gefäßwand, vermindert. Infolge dieser neuen Bedingungen nimmt die von van der Waals korrigierte (reduzierte) Gasgleichung die folgende Form an: $p + \frac{a}{v^2}(v - b) = RT$, an Stelle der früheren Gleichung $pv = RT$. Der Zustand der Gase, der unter gewöhnlichen Umständen ganz unabhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung ist, wird also bei höherem Druck von ihr beeinflußt. Aus der Untersuchung verschiedener Gase unter solchen abnormen Verhältnissen sind die Werte der Korrektionsglieder experimentell zu bestimmen; danach können wir das Molekül messen und zwar diesmal nicht nur relativ, sondern absolut, z. B. im Metermaß. Wir haben die Zahlenwerte, wie sie aus dieser Gleichung folgen, schon auf S. 117 angeführt.

Soll die Molekularattraktion mit der allgemeinen Gravitation dem Wesen nach übereinstimmen, so müßten ohne andere Annahmen die Moleküle, nachdem sie einmal in den Bereich ihrer gegenseitigen Anziehung geraten sind, mit zunehmender Beschleunigung aufeinanderstürzen. Dies geschieht nicht, weil jene Volumkorrektion b schließlich ein unüberwindliches Hindernis entgegensetzt. Sie ist aber nicht etwa dem Volumen des Moleküls selbst gleichzusetzen, sondern beträgt nach weiteren theoretischen Untersuchungen das Vierfache von ihm. Wir dürfen also jenen Widerstand nicht etwa so erklären, daß die Moleküle sich schließlich dicht aneinanderlegen und deshalb eine weitere Annäherung nicht mehr möglich ist; es bleibt vielmehr stets ein Raum zwischen ihnen, der nach allen Seiten hin immer noch größer ist als das Doppelte ihrer

Durchmesser. Dieses Getrennthalten der Moleküle voneinander, das allein nur ihre weitere Betätigung möglich macht, während andernfalls durch die unbeschränkt herrschende Anziehungskraft bald alle Materie zu einem einzigen regungslosen Klumpen vereinigt wäre, ist die Folge der Temperaturschwingungen jener kleinsten Teile. Auch hier sehen wir wieder, daß es die Wärme allein ist, die alles erhält und regelt.

Schon im Wärmekapitel (S. 172) wurde gezeigt, wie die Erhöhung des Druckes allein nicht genügt, um ein Gas zu verflüssigen; es bleibt auch unter dem allerstärksten Drucke gasförmig, wenn seine Temperatur nicht auf einen ganz bestimmten, für jedes Gas verschiedenen Grad herabgesunken ist. Auch dies ist eine Folge der oben geschilderten Beziehungen. Bei verminderter Temperatur werden jene Schwingungen, die der Molekularattraktion eine Grenze setzen, immer kleiner, bis endlich eine neue Gruppierung der Moleküle eintritt, die den flüssigen Zustand bedingt. Diese Kraft der molekularen Temperaturschwingungen ist größer als jede äußere Druckkraft, die wir auszuüben vermögen; nur wiederum andere molekulare Kräfte können sie überwinden.

Jene Temperatur, bei welcher unter einem bestimmten Druck zuerst eine Verflüssigung eines Gases möglich ist, nannten wir die kritische Temperatur, den zugehörigen Druck den kritischen Druck. Unsere vorangehenden Betrachtungen machen es ohne weiteres begreiflich, daß diese kritische Temperatur von der Beschaffenheit der Moleküle abhängig ist, weil jene Minimaldistanz, die für die Gasförmigkeit zwischen den Molekülen erhalten bleiben muß, von deren Größe bedingt wird; sie ist das Vierfache derselben. Dieser theoretisch gefolgerte Zusammenhang der „kritischen Daten“ mit der Größe und Konstitution der Moleküle bestätigt sich praktisch vollkommen. Allerdings kann die Untersuchung nur auf eine verhältnismäßig kleine Reihe von Elementen ausgedehnt werden, die gasförmig zu erhalten sind; aber eine große Zahl von Verbindungen nicht gasförmiger Elemente ließen sich untersuchen, wobei es sich zeigte, daß die kritische Temperatur der einfachen Gase mit ihrem Atomgewicht regelmäßig zunimmt, wie es unserer Anschauung entspricht.

Die kritischen Temperaturen sind wegen der hohen Drucke, mit denen man dabei zu arbeiten hat, schwieriger zu beobachten als die einfachen Siedepunkte bei normalem Atmosphärendruck. Diese verhalten sich, wie vorauszusehen war, genau wie die kritischen Temperaturen, liegen aber selbstverständlich alle tiefer als jene, weil der höhere Druck den engeren Zusammenschluß der Moleküle in den flüssigen Zustand beschleunigen muß. Wir sprachen von diesen Siedepunktsregelmäßigkeiten wiederholt bei der Aufführung der organischen Verbindungen und stellen in dieser Hinsicht nur noch folgende Siedepunktsregeln nach dem mehrfach erwähnten Nernstschen Werke zusammen.

Steigt man in den Alkohol-, Säuren- und Esterreihen um je eine Methylgruppe (CH_3) höher, so steigt der Siedepunkt um 19—21°, bei den Aldehyden dagegen um 26—27°. Weniger Regelmäßigkeit zeigt die Einwirkung dieser Gruppe, wenn sie einem Benzolkern angehängt wird, doch ist die Steigerung des Siedepunktes auch dabei unzweifelhaft.

Ersetzt man in einer organischen Verbindung ein H durch ein Hallogen, etwa Cl, so wird gleichfalls die Verbindung schwerer flüchtig. So siedet die Essigsäure CH_3COOH bei 118°, die Verbindung $CH_2ClCOOH$ (Chloressigsäure) dagegen erst bei 185°. Der Einfluß weiterer Vertauschung von H-Atomen gegen Cl-Atome erhöht indes den Siedepunkt nur wenig mehr: $CHCl_2COOH$ siedet bei 194°, CCl_3COOH um einige Grade höher.

Wird H gegen die Hydroxylgruppe OH vertauscht, so steigt der Siedepunkt um nahezu hundert Grad.

b) Der flüssige Zustand.

Wie immer da, wo man zweifellos auf dem rechten Weg ist, Abweichungen von einer sonst befolgten Regel zu besonders interessanten Aussichtspunkten führen, so haben einschlägige Betrachtungen (Vernon) zu Schlüssen über den molekularen Unterschied zwischen Gasen und Flüssigkeiten geführt, der noch wenig bekannt ist. In einigen Fällen stimmt der beobachtete Siedepunkt von Flüssigkeiten keineswegs mit demjenigen überein, welchen man aus anderen Verbindungen des gleichen Elementes der Regel entsprechend finden würde, daß er sich mit dem Molekulargewicht um ein Bestimmtes erhöhen soll. In bei weitem den meisten Fällen stellt sich heraus, daß die Verdoppelung des Molekulargewichtes den Siedepunkt um rund hundert Grad erhöht. Zum Beispiel siedet Äthylen, C_2H_4, bei $-105°$, Butylen, C_4H_8, bei $-5°$, Oktylen, C_8H_{16}, bei $+126°$ und $C_{16}H_{32}$ bei $+274°$. Nun siedet Schwefelwasserstoff, H_2S, dessen Molekulargewicht $2+32=34$ beträgt, bei $-62°$. Das Molekulargewicht des Wassers, H_2O, ist $2+16=18$, also etwa nur halb so groß wie das des Schwefelwasserstoffmoleküls, in dem nur S gegen O zu vertauschen ist, um Wasser zu liefern. Dieses müßte also nach unserer Siedepunktsregel noch niedriger als Schwefelwasserstoff und jedenfalls unter $-100°$ sieden. Statt dessen siedet es erst bei $+100°$, also reichlich $200°$ höher, als der Regel nach zu erwarten wäre. Gerade die charakteristischste aller Flüssigkeiten zeigt somit eine sehr beträchtliche Abweichung. Vernon erklärt dies daraus, daß in den betreffenden Flüssigkeiten die Moleküle selbst wieder zu Verbänden zusammentreten, daß z. B. das Molekül flüssigen Wassers sich nicht H_2O, wie der Wasserdampf, sondern $(H_2O)_4$ schreibt; es hätten sich also vier Dampfmoleküle zu einem flüssigen vereinigt. Aus diesem Verband müssen sie erst durch die Einwirkung der Temperatur gelöst werden, ehe die Verflüchtigung eintreten kann, und daher kommt die abnorme Erhöhung des Siedepunktes. Auch noch einige andere Stoffe zeigen die gleiche Eigentümlichkeit, z. B. der Fluorwasserstoff gegenüber den Wasserstoffverbindungen der anderen Halogene.

Wir haben die durch die verschiedensten Erscheinungen bestätigte Überzeugung ausgesprochen, daß die Elemente mit sinkender Temperatur in immer mehr zusammengesetzte Verbindungen treten, wozu diese neue Wahrnehmung zu rechnen ist. Die steigende Temperatur löst diese mehr und mehr auf. Selbst noch im Dampfzustand sahen wir z. B. die Moleküle des Schwefels gruppenweise zusammenbleiben (S. 524), und beim Jod spalteten sich die zweiatomigen Moleküle in ihre freien Atome. Bei sehr hohen Temperaturen entstanden selbst Dissoziationen von Stoffen, die unter normalen oder wenig erhöhten Wärmegraden heftig miteinander in Verbindung treten. So kamen wir zu der weiteren Vermutung, daß unter Temperaturen, die bisher von uns nicht herzustellen sind, auch manche Elemente sich als Verbindungen erweisen und in einfachere Stoffe zu trennen sein werden.

Alle diese Umstände machen die Meinung, daß der flüssige Zustand der Materie durch eine Vereinigung der Moleküle zu einer höheren Ordnung von Verbindungen zu erklären sei, recht wahrscheinlich. Es würde dies also im Sinn unserer Grundanschauung bedeuten, daß die Materie in diesem Zustand zu Weltkörpern höherer Größenordnung, als die Gasmoleküle sie darstellen, zusammentreten, zu Körpern, die aber zwischen sich immer noch einen genügenden Spielraum lassen, um nebeneinander vorbeischlüpfen zu können. Die Moleküle eines jeden solchen Verbandes führen einen Teil der Temperaturbewegungen gemeinsam aus und halten dadurch die nötige Entfernung zwischen sich aufrecht,

welche das Fließen möglich macht. Die größere Dichte der Flüssigkeiten gegenüber dem gasförmigen Zustand ist durch die größere Dichte dieser Molekularverbände gleichfalls erklärt. Hier ist es indes nicht immer möglich, die Grenze zwischen den chemischen und rein physikalischen Erscheinungen festzulegen, und in vielen Fällen mögen die betreffenden Molekularverbände darum vom Standpunkt des Chemikers keine Berechtigung mehr haben.

Ist dies Zusammentreten von Molekularverbänden die hauptsächliche Ursache der Verflüssigung der Materie, so müßten danach die Gesetze, die wir an den Gasen beobachtet haben, mit den durch diese Annäherung bedingten Einschränkungen auch beim flüssigen Zustand wiederzufinden sein. Dies scheint auf den ersten Blick durchaus nicht zuzutreffen, und die Gasgesetze scheinen für die Flüssigkeiten keine Geltung zu haben. Alle diese betreffenden Verhältnisse stellen sich vielmehr wesentlich verwickelter dar, die Ausdehnung der Flüssigkeiten steht z. B. in keinem einfachen Verhältnis zur Temperatur.

Vergegenwärtigen wir uns indes die auf S. 529 erörterte reduzierte Zustandsgleichung der Gase, so erkennen wir, daß der Einfluß jener von der gegenseitigen Anziehung und der Raumausfüllung der Moleküle abhängigen Korrektionen van der Waals beim flüssigen Zustande leicht so groß werden kann, daß er das einfache Gesetz von Gay-Lussac ganz verdeckt. Die innere Reibung, als welche wir schon einmal an anderer Stelle die Summe dieser Wirkungen bezeichnet haben, wird zu groß. Die größeren Vereinigungen von Molekülen können sich wohl noch aneinander vorbei bewegen, aber nur mit beständiger Überwindung von Hindernissen, die zwar im gasförmigen Zustand auch bereits auftreten, aber sehr viel geringfügiger sind. Es würde deshalb von großer Wichtigkeit sein, wenn es gelänge, ähnlich freie Zustände auch bei Flüssigkeiten herzustellen, um durch deren Untersuchung die Frage zu entscheiden, ob der flüssige Zustand sich in der Tat mit dem gasförmigen in dem oben angegebenen Sinne vergleichen läßt. Sind die Gasgesetze, die in jenem freisten Aggregatzustande so allgemeine Anwendung finden, wirklich durch die Bewegungen der kleinsten Materieteile bedingt, so müssen sie sich in allen Aggregatzuständen wiederfinden.

Wenn also das Verhalten der Flüssigkeiten mit dem der Gase sich nur wegen der verhältnismäßig sehr großen Nähe der Moleküle in den Flüssigkeiten zueinander nicht vereinbaren läßt, so müßte jenes Mittel, ähnliche Zustände auch in Flüssigkeiten herzustellen, darin bestehen, die Moleküle voneinander zu entfernen, ohne den flüssigen Zustand dabei aufzuheben. Diese Bedingung ist nun in sehr einfacher Weise zu erfüllen, indem man sehr verdünnte Lösungen des betreffenden Stoffes in einem beliebigen Lösungsmittel herstellt. Löst man wenig Zucker in viel Wasser, so verteilt er sich in ihm vollkommen gleichmäßig, so daß in jedem Teile Wasser gleich viele Zuckermoleküle enthalten sind. Diese Erscheinung der vollkommenen Diffusion von Mischungen teilen die Flüssigkeiten mit den Gasen. In solchen verdünnten Lösungen aber sind die Moleküle des gelösten Stoffes verhältnismäßig weit voneinander entfernt, und sie können ihre Bewegung durch Reibung aneinander nicht wesentlich beeinflussen. Ihre Reibung an den Molekülen des Lösungsmittels aber ist überall die gleiche; sie verlangsamt die Bewegung um ein Bestimmtes, kann aber auf deren Gesetzmäßigkeiten nicht anders als durch Hinzufügung eben eines solchen Verlangsamungsfaktors wirken.

Es ist nun die Frage, wie man diese Bewegungen des gelösten Stoffes im Lösungsmittel messen kann. Daß solche Bewegungen vorhanden sind, beweist der ebenso von den Flüssigkeiten wie von den Gasen auf die Gefäßwände allseitig ausgeübte Druck, den wir den hin und her pendelnden Bewegungen ihrer kleinsten Teile zuschreiben. Es käme also darauf an, denjenigen

Teil dieses Druckes messen zu können, der den Molekülen des gelösten Stoffes allein zuzuschreiben ist. Hierzu bieten die Erscheinungen des **osmotischen Druckes**, mit denen wir uns schon in unserem physikalischen Abschnitt, S. 123, beschäftigt haben, eine vortreffliche Handhabe. Es ist das große Verdienst **van't Hoffs** (sein Bildnis s. unten), sie zuerst angewandt zu haben.

Wenn man über einer Zuckerlösung eine Wasserschicht bildet, so daß beide Flüssigkeiten getrennt im völligen Ruhezustande sind, so wird bald der schwerere Zucker teilweise in die über ihm stehende Wasserschicht hinaufsteigen, also eine Arbeit gegen die Schwerewirkung ausführen, bis eine gleichmäßige Verteilung der Zuckermoleküle eingetreten ist. Diese Arbeit entspricht dem von den Zuckermolekülen allein ausgeübten Druck, den wir messen wollen. Er tritt als sogenannter **osmotischer** Druck auf, wenn man die beiden Flüssigkeiten durch eine durchlässige Membran, etwa eine Tierhaut (Schweinsblase), trennt. Die Poren lassen von der einen Lösung, die aus größeren Molekülen besteht, weniger durch als von der anderen, und es entstehen jene Niveauerhöhungen oder -Erniedrigungen, von denen wir in dem Physikabschnitt gesprochen haben (S. 123), und die auch bei den physiologischen Vorgängen eine so überaus wichtige Rolle spielen. Für unsere Zwecke aber brauchen wir eine Wand, die den einen Stoff gar nicht, den anderen dagegen leicht durchläßt, denn nur so können wir den ganzen, vom gelösten Stoffe geübten Druck ohne weitere Annahmen messen. Solche **halbdurchlässigen (semipermeabeln) Wände** sind wirklich für bestimmte Paare von Stoffen hergestellt worden. Eine Schicht von Ferrocyankupfer, die **M. Traube** anfertigte, hat z. B. die Eigenschaft, wohl Wasser, aber keine Zuckermoleküle durchzulassen. Wenn man aus einem solchen halbdurchlässigen Stoffe die Wand eines Gefäßes herstellt, in das man eine verdünnte Zuckerlösung füllt, und es in ein größeres, mit Wasser gefülltes Glas tauchen läßt, so dringt allmählich Wasser von hier in das kleinere Gefäß und verdünnt die in ihm enthaltene Lösung, während umgekehrt kein Zuckermolekül in das Wasser des äußeren Gefäßes gelangen kann. Durch die Vermehrung des Inhaltes steigt die Flüssigkeit in dem kleineren Gefäß; schließt man es bis auf ein enges Steigrohr, so gibt die Höhe, bis zu welcher die Flüssigkeitssäule nach einiger Zeit in ihm gelangt ist, den zu messenden osmotischen Druck direkt an, dem durch den Druck der Flüssigkeitssäule das Gleichgewicht gehalten wird. Die Abbildung auf S. 534 erläutert diesen Versuch.



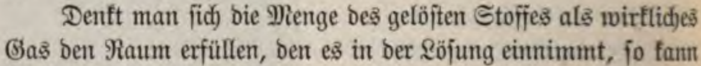
J. J. van't Hoff   Nach Werckmeister, „Das 19. Jahrhundert in Bildnissen".

Bei den Versuchen über den osmotischen Druck verschiedengradiger Lösungen auf diesem oder auf anderem Wege zeigte es sich, daß der Druck bei unveränderter Temperatur gleichmäßig mit der Anzahl der im Lösungsmittel enthaltenen Moleküle der gelösten Substanz wächst, daß aber die Art des Lösungsmittels selbst ohne Einfluß ist. Ist also der Druck bei einer einprozentigen Lösung gleich einer gewissen Einheit, so beträgt er bei einer zweiprozentigen noch einmal soviel. Denken wir uns nun das wirkungslose Lösungsmittel entfernt, so bleibt die gelöste Substanz in dem leeren Raum in derselben Weise verteilt, wie die Moleküle eines Gases es sein würden. Bei noch einmal so großer Konzentration der Lösung stehen die Moleküle doppelt so dicht beisammen und verhalten sich, was die Verteilung der Materie betrifft, wie ein noch einmal so stark verdichtetes Gas, u. s. f. Der Grad der Konzentration entspricht also der Gasdichte, von der wir wissen, daß sie bei gleicher Temperatur proportional dem Drucke zunimmt: Das Boyle-Mariottesche Gesetz gilt auch für die verdünnten Lösungen.



Messung des osmotischen Druckes verdünnter Lösungen. Vgl. Text, S. 533.

Nun wurden die Versuche bei verschiedenen Temperaturen fortgesetzt. Man sah (Pfeffer), daß der osmotische Druck mit der Temperatur stieg. Die beobachteten Werte des Druckes ließen sich für eine einprozentige Zuckerlösung am besten mittels der rein empirisch gefundenen Formel $P = 0{,}649\ (1 + 0{,}00367\ t)$ Atmosphären durch Rechnung mit der Beobachtung in Übereinstimmung bringen. Der Temperaturfaktor dieser Formel, 0,00367, ist aber genau gleich dem der Gasgleichung (S. 156), nämlich gleich $\frac{1}{273}$, d. h., auch in verdünnten Lösungen nimmt der Druck proportional der absoluten Temperatur zu; das Gay-Lussacsche Gesetz ist gleichfalls erfüllt. Auch hier ist die Art des Lösungsmittels ohne Einfluß.



Denkt man sich die Menge des gelösten Stoffes als wirkliches Gas den Raum erfüllen, den es in der Lösung einnimmt, so kann man mit Hilfe der Gasgleichung den Druck berechnen, den es bei einer bestimmten Temperatur ausüben würde. Dieser ist wieder genau dem beobachteten osmotischen Druck gleich, wie er aus der oben gegebenen empirischen Formel von Pfeffer folgt. Die Moleküle im Lösungsmittel verhalten sich also in jeder Hinsicht genau wie die eines Gases. Danach haben Lösungen, die einen gleichen osmotischen Druck ausüben, bei gleicher Temperatur im gleichen Volumen auch eine gleiche Anzahl von Molekülen, so daß auch die Avogadrosche Regel für die verdünnten Lösungen gilt. Alle diese für unsere Anschauungen über die molekularen Vorgänge so überaus wichtigen Übereinstimmungen leitete van't Hoff 1885 aus seinen epochemachenden Untersuchungen verdünnter Lösungen ab und verhalf dadurch der theoretischen wie der praktischen Chemie zu ungeahnten Fortschritten.

So kann man heute die Dampfdichte von Stoffen, die gar nicht in Dampfform gebracht werden können, genau mit Hilfe ihres osmotischen Druckes bestimmen, weil wir wissen, daß die eine gleich dem andern ist. Es sind somit auf diese Weise auch die Molekulargewichte der nur löslichen, nicht zu verflüchtigenden Elemente mit derselben Sicherheit zu bestimmen, wie die der Gase.

Auch insofern verhalten sich die Lösungen wie Gase, als die eben gefundenen Gesetze des osmotischen Druckes nicht mehr für größere Konzentrationen gültig bleiben, ebenso wie die

Gase bei hohem Druck der van der Waalsschen Korrektionen bedurften. Der Sinn der Abweichungen scheint in den meisten untersuchten Fällen übereinzustimmen, doch fehlt es hierüber zur Zeit noch an genügend scharfen Bestimmungen.

Durch alle diese Erfahrungen an den verdünnten Lösungen ist jedenfalls bewiesen, daß die Flüssigkeiten nur deshalb von den Gasen verschiedene Eigenschaften zeigen, weil die innere Reibung zu groß wird, um nach der veränderten molekularen Gruppierung, die mit dem Flüssigwerden verbunden ist, den größeren Molekülen noch genügenden Spielraum für die Betätigung der Gasgesetze zu lassen.

Eine ganz allgemeine und lange schon bekannte Eigenschaft der Lösungen ist die *Erhöhung ihres Siede-* und die *Erniedrigung ihres Schmelzpunktes* durch den Zutritt des gelösten Stoffes. Es ist bekannt, daß eine Mischung von Schnee und Salz schwerer schmilzt als Schnee allein; es ist eine sogenannte *Kältemischung*. Ebenso friert das Meerwasser schwerer, bei einem tieferen Schmelzpunkt, als reines Wasser. Aber es siedet auch schwerer; sein Siedepunkt liegt über 100°. Die erstere Tatsache erscheint zunächst sehr merkwürdig, weil doch der feste, zu lösende Stoff, wie Salz, Zucker u. s. w., jedenfalls schwerer schmilzt als Eis, während die Mischung beider im Lösungsmittel beträchtlich leichter schmilzt, flüssiger ist, als der am leichtesten schmelzbare Stoff der beiden. *Raoult* hatte 1883, also vor den Untersuchungen van't Hoffs, durch Versuche die Regel gefunden, daß *die Erniedrigung des Schmelzpunktes proportional ist dem Verhältnis der Anzahl der gelösten Moleküle zu denen des Lösungsmittels und von der Art der beiden Stoffe nicht abhängt.* Erst nach der Entdeckung der van't Hoffschen Gesetze des osmotischen Druckes ließ sich zeigen, daß die Regel von Raoult eine notwendige Folge jenes Druckes ist.

Aus der Raoultschen Regel folgt die Gefrierpunktserniedrigung auf rein empirischem Wege. Die Formel lautet $t = \frac{Em}{M}$, wobei E ein vom Lösungsmittel abhängiger Faktor, m die Anzahl der Gramme des auf 100 g des Lösungsmittels zu verteilenden fremden Stoffes und M dessen Molekulargewicht bedeutet. Mit dem Faktor E des Wassers 18,5 können wir ohne weiteres die Gefrierpunktserniedrigung jeder beliebigen Lösung in Wasser berechnen; sie erweist sich mit der Beobachtung überall übereinstimmend, wo nicht durch besondere Einflüsse bei der Lösung Dissoziationen der Moleküle stattfinden, die die Gefrierpunktserniedrigung noch weiter vergrößern, weil der Divisor M, das Molekulargewicht, durch diese Dissoziationen immer verkleinert wird. Dieser Fall tritt z. B. bei den Salzlösungen vielfach ein, die sich darum zu Kältemischungen besonders eignen. Dagegen können wir leicht sehen, daß eine Lösung von Rohrzucker sich sehr wenig dazu eignet, denn das Molekulargewicht dieser Verbindung, $C_{12}H_{22}O_{11}$, ist ein sehr großes, nämlich $(12 \times 12) + 22 + (11 \times 16) = 342$; wir erhalten für die Gefrierpunktserniedrigung einer zehnprozentigen Zuckerlösung in Wasser $t = 18{,}5 \times \frac{10}{342} = 0{,}53^\circ$, sie gefriert also etwa bei $-\frac{1}{2}$ Grad. Ganz anders stellen sich auch ohne Berücksichtigung jener verstärkenden Dissoziationserscheinungen die Verhältnisse beim Kochsalz, dessen Molekulargewicht nur 58,5 ist. Die Gefrierpunktserniedrigung einer zehnprozentigen Kochsalzlösung beträgt nach der gleichen Formel mehr als 3 Grad.

In ganz gleicher Weise und mit denselben Formeln berechnet sich nun auch die Siedepunktserhöhung der Lösungen, indem man statt der Schmelzwärme die Verdampfungswärme und für die Gefriertemperatur den Siedepunkt einsetzt.

Mit diesen eigentümlichen, aber doch aus einer allgemeinen Gesetzmäßigkeit folgenden Eigenschaften der Lösungen haben wir uns eingehender beschäftigt, weil sie im Haushalt der

irdischen Natur eine wichtige Rolle spielen, sowohl in den großen, mit der Zirkulation des Wassers durch die Meeresbecken zusammenhängenden geophysischen Verhältnissen als auch in den Bewegungen der Materie in den Körpern der lebenden Wesen, wo dem osmotischen Druck die allerwichtigsten Aufgaben zuerteilt sind.

Im vorangehenden Abschnitt wurde gezeigt, daß die Veränderungen des Gefrier- und Siedepunktes in einer ganz bestimmten gesetzlichen Weise vom Molekulargewicht des gelösten Stoffes abhängen. Die experimentelle Bestimmung dieser Abweichungen gibt umgekehrt eine weitere Möglichkeit, dieses Molekulargewicht zu ermitteln. Wir haben hier einen dritten Weg zur Kenntnis dieser wichtigsten, jedem Stoff eigentümlichen Konstanten, die durch die Messung der Dampfdichte, des osmotischen Druckes und jener Temperaturabweichungen zu bestimmen ist. In vielen Fällen können für ein und dieselbe Substanz alle drei Wege eingeschlagen werden, und wir dürfen angesichts der Übereinstimmung der so erlangten drei Werte wohl überzeugt sein, daß unsere Grundanschauungen über das Wesen der molekularen Bewegungen, also die Grundlehren der modernen chemischen Dynamik, die richtigen sind. Immer einheitlicher gruppieren sich unsere physikalischen wie chemischen Erfahrungen über die Materie um den Wert ihrer Masse in den Molekulargewichten.

Wir gehen hier, um den Gedankengang nicht zu verlieren, gleich noch einen Schritt weiter in das Gebiet des festen Zustandes, den wir im allgemeinen erst später behandeln. Es gibt auch feste Lösungen, von denen wir die Metalllegierungen bereits kennen gelernt haben. Auch für diese gelten dieselben Gesetze, die Raoult und van't Hoff für die gewöhnlichen Lösungen gefunden hatten. Besonders wurde erwähnt (S. 465), daß der Schmelzpunkt der Legierungen stets (wiederum mit den Ausnahmen, bei denen Dissoziationen stattfinden) tiefer liegt als der des am leichtesten schmelzbaren Metalles in dem Gemisch, und die Größe dieser Schmelzpunktserniedrigung entspricht wieder dem Verhältnis der Anzahl der Moleküle des einen zu denen des anderen Metalles. Es ist auch hier wieder durch Beobachtung des Schmelzpunktes von Legierungen das Molekulargewicht der Metalle zu bestimmen. Dabei ergab sich die für unsere astronomischen Vermutungen über die Einatomigkeit der Metalldämpfe (S. 522) interessante Tatsache, daß auch in den Legierungen bei weitem die meisten, wahrscheinlich sogar alle Metalle einatomig auftreten. Diese Gemische charakterisieren sich hierdurch als wirkliche chemische Verbindungen, die allerdings sehr leicht wieder zu trennen sind; denn die Doppelatome der gewöhnlichen Metallmoleküle müssen sich erst spalten, um sich einzeln mit je einem Atom des anderen Metalles zu verknüpfen. Also selbst bei der verhältnismäßig geringen Verwandtschaft, die die Metalle zueinander haben, geht diese Spaltung vor sich. Es ist darum kaum zweifelhaft, daß sie im Dampfzustand einatomig sind. Auch hier sind wir, geleitet von unseren Grundanschauungen, auf zwei ganz verschiedenen Wegen, von denen der eine sogar über einen anderen Himmelskörper hinweg wieder zu irdischen Verhältnissen zurückkehrt, zu dem gleichen Resultat gelangt.

Diese Anwendbarkeit der Gasgesetze bis zu der Ermittelung der Eigenschaften der dichtesten Stoffe unter den Metallen und ihren Legierungen beweist von einer anderen Seite her, als es gewöhnlich geschieht, daß auch in diesen die Moleküle noch eine gewisse freie Bewegung bewahren, die ihnen die Befolgung jener Gesetze allein möglich machen kann. Auch im festen Zustand findet unter Umständen noch ein Ineinanderübergehen verschiedener miteinander durch starken Druck in Berührung gebrachter Stoffe statt, das einer Erscheinung der Diffusion der Gase und Flüssigkeiten entspricht. Aneinander gepreßte Metallstücke, bei denen man eine etwa durch Druck

hervorgebrachte Temperaturerhöhung völlig ausschließt, schweißen dennoch aneinander, wenn man sie längere Zeit unter Druck läßt. Immer mehr Moleküle des einen Stückes greifen vermöge ihrer gewöhnlichen Temperaturschwingungen in die Maschen des molekularen Gewebes des anderen hinüber und verketten sich mit ihm. Bei dem Quecksilber sind die Diffusionserscheinungen so groß wie bei den wässerigen Lösungen.

Ebenso wie chemische Vorgänge durch Wärmezufuhr beeinflußt werden, bringen sogar die chemischen Vorgänge Wärme hervor, wie ja die Verbrennungsprozesse rings um uns her zeigen; oder sie verbrauchen Wärme. Wir haben uns von den molekularen Vorgängen Rechenschaft zu geben, durch welche die chemischen Kräfte solche Temperaturänderungen hervorbringen.

Vergegenwärtigen wir uns zu diesem Zweck zunächst, was wir über die molekularen Vorgänge, die den Temperaturerscheinungen zu Grunde liegen, schon in unserem Wärmekapitel S. 163 u. f. in Erfahrung gebracht haben. Wir sahen, daß die Kraft, welche in der Form von Wärme den Gasen zugeführt werden kann, die Bewegungen der Moleküle in zweierlei Weise beeinflußt; erstens vergrößert sie die Ausschlagsgröße ihrer hin- und herpendelnden Bewegung — wir bezeichneten dies als Vergrößerung ihrer Umlaufsbahnen —, wodurch also die Ausdehnung vergrößert und nach außen hin Arbeit geleistet wird, und zweitens wird die Geschwindigkeit in diesen Bahnen erhöht, wodurch die Temperatursteigerung entsteht, die wir bei gleicher in Kalorien ausgedrückter Wärmezufuhr für jeden Körper verschieden fanden. Es zeigte sich die merkwürdige Tatsache, daß diese spezifische Wärme der Körper ihren Atomgewichten proportional ist, so daß das Produkt aus beiden, die Atomwärme, eine konstante, etwa bei 6,3 liegende Zahl bildet. Dasselbe geht auch aus der Untersuchung der chemischen Verbindungen hervor; die spezifische Wärme einer solchen, multipliziert mit ihrem Molekulargewicht, ist eine Konstante, die Molekularwärme. Derjenige Teil der Wärmeenergie, der zur Vergrößerung jener „Bahngeschwindigkeit" verwendet wird, bemißt sich demnach nach dem Gewicht der zu bewegenden Körper, was wir ohne weiteres begreifen.

Bei den chemischen Vorgängen treten nun Umgruppierungen jener kleinsten Materieteile ein, die die Bahnbewegungen wesentlich verändern müssen. Ein großer Teil derjenigen Energie der Materie, durch welche jene inneren Bewegungen der Moleküle und der Atome in ihren molekularen Verbänden geschehen, der potentiellen Energie oder „Potential" (im Gegensatze zu der kinetischen Energie, die die Arbeitsleistung der Ausdehnung u. s. w. besorgt), wird also durch die chemischen Vorgänge in neue Verhältnisse gebracht. Dabei kann ein Teil dieser potentiellen Energie, namentlich wenn es sich um Verbindungen handelt, in denen die Atome sich zu engeren Gruppierungen vereinigen, in kinetische übergehen, d. h. es kann Wärme entwickelt werden.

Die Summe der Veränderungen beider Arten von Energien, also die Temperaturveränderung und die Arbeitsleistung, welche wir bei einem chemischen Vorgang beobachten, nennen wir seine Wärmetönung. Ein Beispiel mag dies erläutern. Bringen wir Zink mit verdünnter Schwefelsäure H_2SO_4 in Berührung, so vertreibt das Zink den Wasserstoff aus der Säure und setzt sich an seine Stelle; es entsteht Zinksulfat, das Verbrennungsprodukt von Zink und Schwefelsäure, $ZnSO_4$, während der Wasserstoff entweicht. Das Atomgewicht des Zinks ist 65,4. Nehmen wir nun ebensoviel Gramm (also ein sogenanntes g-Atom) zu unserem Versuch, so müssen sie, da für jedes Atom Zink immer zwei Atome Wasserstoff ausgeschieden werden, genau 2 g-Atome Wasserstoff freimachen. Dabei tritt eine bedeutende Wärmeentwickelung

ein, aus deren Messung mit einem Kalorimeter wir finden, daß jene 65,4 g Zink bei ihrer Verbrennung 34,200 Kalorien entwickeln, vorausgesetzt, daß der Versuch bei einer äußeren Temperatur von 20° ausgeführt wird. War also die Schwefelsäure mit 500 g Wasser verdünnt, so mußten sich diese, dem Begriff der Kalorie entsprechend, um $\frac{34200}{500} = 68°$ erwärmen. Durch das Entweichen der 2 g-Atome Wasserstoff wird, da er ja den Atmosphärendruck überwinden muß, um frei zu werden, eine Arbeit verrichtet, um deren Größe sich die Gesamtenergie der beteiligten Materie vermindert. Um die ganze Wärmetönung dieses Prozesses zu finden, müssen wir diese Arbeit, in derselben Einheit von Kalorien berechnet, den genannten 32,400 hinzufügen. Unsere Betrachtungen auf S. 160 lehren uns diese Rechnung ausführen. Wenn wir nämlich den dort gefundenen konstanten Faktor der Gasgleichung 0,0819 in Kalorien ausdrücken, erhalten wir dafür 1,99 oder abgerundet 2 Kalorien, und es ergibt die Gasgleichung für die Arbeitsleistung von 2 g Wasserstoff, der, bei 20° freiwerdend, dem Druck einer Atmosphäre die Wage hält $2(273 + 20)$, $= 586$ Kalorien. Die gesamte Wärmetönung beträgt also in unserem Falle $34{,}200 + 586 = 34{,}786$ Kalorien.

Bei diesem Vorgang ist der Einfluß der Arbeitsleistung nur sehr gering im Vergleich zu der Wärmeentwickelung. Er wird noch wesentlich geringer, wenn kein Gas entweicht, die Arbeitsleistung also nur in einer Ausdehnung besteht, und kann deshalb in den meisten Fällen vernachlässigt werden.

Dagegen ist die bei den verschiedenen chemischen Vorgängen entwickelte Verbrennungswärme eine sehr verschiedene, wie schon die allgemeinste Erfahrung lehrt. Während bei der Verbrennung des Zinks im genannten Beispiel von jedem Gramm $\frac{34200}{65{,}4} = 525$ Kalorien entwickelt wurden, macht jedes Gramm Wasserstoff bei seiner Verbrennung zu Wasser 68,400 Kalorien frei, das ist etwa 130mal soviel.

Es sind in folgenden Reihen nach Nernst einige Wärmetönungen von Verbindungen (Bildungswärmen) angeführt, die, mit geringen Differenzen, mit den betreffenden Verbrennungswärmen (wenn es sich um eine Sauerstoffverbindung handelt) identisch sind. Die Zahlen sind wieder in Kalorien angegeben.

			Bemerkung
$2H + O = H_2O$	= flüssiges Wasser	+ 67,5	
$C + 2O = CO_2$	= Kohlensäure aus verbrennendem Diamant	+ 94,3	
$C + O = CO$	= Kohlenoxyd aus Diamant	+ 26,6	
$S + 2O = SO_2$	= schweflige Säure	+ 71,1	(aus α-Schwefel)
$H + F = HF$	= Fluorwasserstoff	+ 38,6	(aus gasförmigem Fluor)
$H + Cl = HCl$	= Chlorwasserstoff	+ 22,0	(aus gasförmigem Chlor)
$H + Br = HBr$	= Bromwasserstoff	+ 8,4	(aus flüssigem Brom)
$H + J = HJ$	= Jodwasserstoff	— 6,1	(aus festem Jod)
$N + O = NO$	= Stickstoffmonoxyd	— 21,6	
$N + 2O = NO_2$	= Stickstoffdioxyd	— 7,7	(dissoziiertes Gas oder Untersalpetersäure)
$2N + 4O = N_2O_4$	= Stickstoffdioxyd	— 2,6	(Doppelmolekül der vorigen)
$K + F = KF$	= Fluorkalium	+ 109,5	
$K + Cl = KCl$	= Chlorkalium	+ 105,6	
$K + Br = KBr$	= Bromkalium	+ 95,3	
$K + J = KJ$	= Jodkalium	+ 80,1	

Diese Zusammenstellung ist in mehrfacher Hinsicht lehrreich. Zunächst zeigt sie, daß es auch sehr beträchtliche negative Wärmetönungen gibt, also Verbindungen, die zu ihrer Herstellung

Energie verbrauchen, obgleich sich auch bei ihnen einzelne Atome zu Molekülen zusammenfügen, also durch die chemischen Kräfte eine Verdichtung der Materie hervorgebracht und Wärme frei wird. Diese negative Wärmetönung bei Herstellung von Verbindungen erklärt sich aber sofort dadurch, daß es sich hier immer um die Differenz zweier Energiemengen handelt. Es muß stets vorher das Doppelatom eines Elementes zerrissen werden, ehe sich seine beiden Teile neu verbinden. Bei einigen Elementen ist offenbar die zur Spaltung ihrer Moleküle erforderliche Kraft größer, als die, welche bei der betreffenden Verbindung frei wird.

Interessant sind hier wieder die vier Halogenwasserstoffe, die ihre große Ähnlichkeit zueinander durch eine regelmäßige Abstufung ihrer Wärmetönungen verraten. Das reaktionsfähigste, beweglichste, leichteste Element unter ihnen, Fluor, spaltet sich auch am leichtesten, um eine neue Verbindung einzugehen, und bis hinab zum Jod werden die Halogene entsprechend ihren Atomgewichten, auch im Hinblick auf ihre Wärmeentwickelung, immer träger. Ganz in demselben Sinn, wenn auch quantitativ verschieden, sind die Abstufungen bei der Verbindung dieser vier Elemente mit Kalium.

Löst man gasförmige, flüssige oder feste Körper in Wasser, so beobachtet man keineswegs immer nur eine Temperaturerniedrigung, wie man nach unseren Betrachtungen über den osmotischen Druck in verdünnten Lösungen schließen sollte, der stets den Gefrierpunkt erniedrigt, wodurch ein Energieverbrauch angezeigt wird; im Gegenteil findet bei der Lösung häufig eine beträchtliche Wärmeentwickelung statt. Dies zeigt aber immer an, daß zwischen den in Berührung kommenden Stoffen eine chemische Vereinigung stattgefunden hat, die auch durch die gleichzeitig beobachtete Volumenverminderung bewiesen wird. Gießt man z. B. konzentrierte Schwefelsäure in Wasser, so scheint sie insofern beinahe in ihm zu verschwinden, als die Raummenge des Gemisches keineswegs in dem Maße steigt, wie es der Hinzufügung von Schwefelsäure entspricht. Dafür aber bemerkt man eine recht bedeutende Temperaturzunahme. Das von dem Schwefelsäureanhydrid gebundene Wasser läßt sich nicht durch einfache Destillation wieder von ihm trennen; es ist eben eine chemische Verbindung geworden. Die große Anziehungskraft der Schwefelsäure zum Wasser wird bekanntlich zu Trockenvorrichtungen benutzt; solche Wasser anziehende Körper nennt man hygroskopisch.

c) Der feste Zustand.

Ebenso wie die anderen Temperaturdaten zeigen auch die Schmelzpunkte der Stoffe sehr interessante Regelmäßigkeiten. In folgender Tabelle (S. 540), die der auf S. 510 gegebenen Anordnung der natürlichen Elemente entspricht, sind zunächst die Schmelzpunkte der Elemente nach dem periodischen System und in absoluter Temperaturzählung geordnet.

Wir sehen, daß der Schmelzpunkt der Elemente bei fortschreitendem Atomgewicht in einer deutlichen Wellenlinie auf- und absteigt. Noch deutlicher tritt dies hervor, wenn man die Kurve zieht, welche das Atomvolumen mit dem Atomgewicht in Beziehung bringt (s. die Abbildung, S. 541). Als Atomvolumen bezeichnet man das durch die Dichte dividierte Atomgewicht eines Elementes, wobei man natürlich immer nur die Dichte in ein und demselben Aggregatzustand, in unserem Falle dem festen, nehmen kann. Das Atomvolumen ist nach obiger Definition der Raum, den die Masse eines Atoms im festen Zustand einnimmt. Es scheiden also die wenigen Elemente aus, die man noch nicht in feste Form zu bringen vermochte. Die Atomvolumina zeigen nun weit geringere Unterschiede zwischen den verschiedenen Elementen als die Atomgewichte; denn diese steigen von 1 beim Wasserstoff bis 240 beim Uran an,

während das kleinste bekannte Atomvolumen im festen Zustand, das des Kohlenstoffes, mit 3,6 und das größte, das des Rubidiums, mit 56,1 anzusetzen ist. Dieses steht aber schon ziemlich vereinzelt, denn das nächstkleinere Atomvolumen hat das Kalium mit 45,4. Dürfte man annehmen, die Atome seien kugelförmig, so würden die dritten Wurzeln aus diesen Zahlen die Verschiedenheit ihrer relativen Durchmesser angeben. Nimmt man den des Kohlenstoffes als Einheit, so findet sich, daß das größte Atom, das des Rubidiums, im Durchmesser nur etwa zweieinhalbmal größer ist.

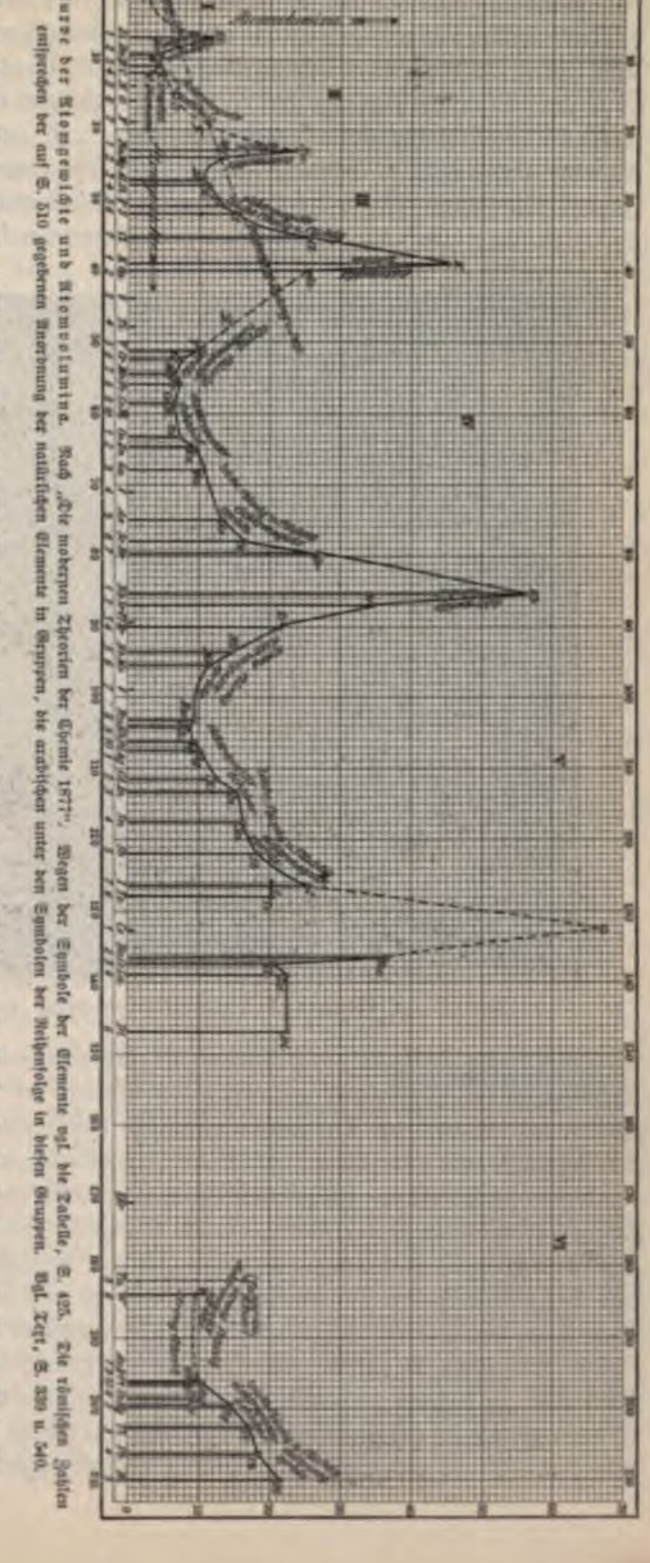
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
H u. 40								He s. n.	
Li 453	Be üb. 1270	B s. h.	C n. g	N s. n.	O s. n.	F s. n.?		Ne s. n.	
Na 369	Mg 1070	Al 1000	Si s. h.	P rot 528 weiß 317	S 388	Cl 171		A s. n.	
K 335	Ca h. a. Sr	Sc ?	Ti n. g.	V n. g.	Cr üb. 2270	Mn 2170	Fe 1977	Co 2070	Ni 1870
Cu 1355	Zn 691	Ga 303	—	As üb. 773	Se 490	Br 266		Kr s. n.	
Rb 311	Sr h. a. Ba	Y ?	Sr h. a. Si	Nb n. g.	Mo s. h.	—	Ru 2070	Rh 2270	Pd 1973
Ag 1241	Cd 591	In 449	Sn 503	Sb 700	Te 800	J 387		X s. n.	
Cs 299	Ba 748	La üb. 710 Ce u. 1273	—	—	—	—		—	
—	—	—	—	Ta n. g.	W s. h.	—	Os 2770	Ir 2220	Pt 2050
Au 1345	Hg 233	Tl 563	Pb 597	Bi 542	—	—			
			Th ?		U s. h.				

Schmelzpunkte der Elemente in absoluter Zählung (von —273° an).
Es sind folgende Abkürzungen benutzt: n. g. = nicht geschmolzen; s. h. = sehr hoch; s. n. = sehr niedrig; üb. = über; u. = unter; h. a. = höher als; n. a. = niedriger als.

Diese Annahme der Kugelförmigkeit ist allerdings nicht erlaubt, aber die Zahlen geben doch jedenfalls ein Bild davon, daß die Größenverschiedenheit der Atome keine sehr bedeutende sein wird.

Diese Größen der Atome stehen, wie Lothar Meyer zuerst zeigte, in einem sehr merkwürdigen Verhältnis zu den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Elemente. In der Kurve sind in horizontaler Richtung die Atomgewichte, in vertikaler die Atomvolumina nach ihren Werten eingetragen. Die Verbindung dieser Punkte bildet eine sehr ausgeprägte Wellenlinie, deren Maxima unverkennbare Beziehungen zu den Reihen des natürlichen Systems von Mendelejeff (S. 510) haben. Jede der in der Kurve mit römischen Zahlen zusammengefaßten Gruppen hat ihr Maximum und Minimum. In der Darstellung ist es mit zum Ausdruck gebracht, wie mit den Zweigen dieser Kurve die elektrischen Eigenschaften und die

Schmelzpunkte der Elemente steigen und fallen. Mit steigendem Atomvolumen werden die Stoffe in den verschiedenen Wellen der Kurve, wenn auch nicht in gleichem Grad, immer leichter schmelzbar, während mit fortschreitendem Atomgewicht, also mit dem Herabsteigen zu den tieferen Reihen, die Schmelzbarkeit im allgemeinen abnimmt. In derselben Weise wechseln die elektrischen Eigenschaften ihr Vorzeichen. Zunächst nimmt im allgemeinen mit zunehmender Masse die Schmelzbarkeit ab. Das ist unmittelbar verständlich, denn um eine größere Masse zu schmelzen, wird eine größere Energie verbraucht. Innerhalb dieser Regel erscheinen aber Abweichungen, die von der Körpergröße allein, nicht von der in ihr enthaltenen Masse, abhängen: von der Menge der Materie, also der Masse, welche aufzulösen ist, abgesehen, sind die größeren Atome die leichter schmelzbaren, und dies ist von unserem kinetischen Standpunkt aus wieder erklärlich, weil die größeren Atome den Stößen eine größere Fläche bieten, also mehr Angriffen ausgesetzt sind als kleinere. Auch hier finden wir also wieder eine schöne Bestätigung unserer Grundanschauungen, obschon, wie in den meisten ähnlichen Fällen, eine genaue zahlenmäßige Prüfung noch nicht möglich ist. Ebenso eigentümlichen Verhältnissen wie bei den Elementen begegnet man auch bei den Schmelzpunkten ihrer Verbindungen.


Kurve der Atomgewichte und Atomvolumina. Nach „Die modernen Theorien der Chemie 1877". Wegen der Symbole der Elemente vgl. die Tabelle, S. 425. Die römischen Zahlen entsprechen der auf S. 510 gegebenen Anordnung der natürlichen Elemente in Gruppen, die arabischen unter den Symbolen der Reihenfolge in diesen Gruppen. Vgl. Text, S. 539 u. 540.

Wie aber haben wir uns den **molekularen Zustand der festen Körper** überhaupt zu denken? Stellen wir uns zunächst die charakteristischen Eigenschaften des festen Zustandes vor. Unter den festen Körpern unterscheiden wir **kristallinische** und **nichtkristallinische, amorphe**; anderseits zeigt eine gewisse Klasse von Körpern den eigentümlichen **metallischen Zustand**, der kristallinisch und amorph auftreten kann, und endlich beobachten wir als eine Art von Übergangsform aus dem Flüssigen den sogenannten **kolloidalen**, gelatineartigen Zustand. Auch dieser kann unter Umständen eine kristallinische Form annehmen, wie es sogar flüssige Kristalle gibt. Wir befassen uns zunächst mit der kristallinischen Form der Materie.



Eisblumen. Nach Photographie aus Printz, „Fleurs de Glace".

Wie die **Kristalle** äußerlich entstehen, ist allbekannt; wir sehen sie jeden Winter wieder mit Entzücken an den Fensterscheiben wachsen, diese Blumen der leblosen Natur (s. die obenstehende Abbildung). Sobald die Temperatur unter den Gefrierpunkt des Wassers sinkt, bilden sich diese feinen Nadeln und schießen aneinander zu wunderbaren Formen, bis schließlich aus ihrem kunstvollen Flechtwerk eine fest zusammenhängende Masse, eine Eistafel, wird, die auf dem noch flüssigen Wasser schwimmt. Aber nicht alle Kristallisationsprozesse gehen in dieser Weise vor sich. Das Wasser bildet eine für uns sehr glückliche Ausnahme, indem seine Kristalle leichter sind als flüssiges Wasser. In den meisten Fällen ist es umgekehrt, und der Kristallisationsprozeß beginnt auf dem Grunde der Flüssigkeit. Zu seinem Eintritt bedarf es meist eines gewisses Anstoßes. Hat man z. B. eine von Unreinlichkeiten befreite Lösung durch langsames Abdampfen übersättigt, so daß der Prozentsatz des gelösten Stoffes zu dem Lösungsmittel größer ist, als er unter gewöhnlichen Verhältnissen herzustellen sein würde, so kann doch der Kristallisationsprozeß ebenso wie das Sieden (s. S. 171) nach Erreichen der für den betreffenden Stoff

passenden Temperatur unterbleiben, bis man einen noch so kleinen Gegenstand in die Lösung wirft, um den sich nun sofort ein Kristall bildet und andere anschließen, bis der ganze Stoff auskristallisiert ist. Wir beobachten also einen **Kristallisationsverzug**, wie es einen Siedeverzug gibt, und wie es zur Nebelbildung in der Atmosphäre der Staubbeimengung bedarf, die überhaupt eine wichtigere Rolle im Naturgetriebe spielt, als man vermuten sollte.

Jeder Stoff, Element oder Verbindung, kann höchstwahrscheinlich, wenn er überhaupt fest wird, in Kristallform auftreten, aber gewisse Stoffe kristallisieren häufiger und leichter als andere, und von einigen, wie vom Diamant, kennt man die Bedingungen noch gar nicht, unter denen sie einst auskristallisierten.


Monokline Oktaeder des sublimierenden Schwefels.

Der Kristallisationsprozeß kann auf verschiedene Art eingeleitet werden, aber immer ist eine Temperaturerniedrigung des betreffenden Stoffes dazu nötig. So können Körper aus dem gasförmigen Zustand direkt, also mit Überspringung des flüssigen, auskristallisieren. Man nennt diesen Vorgang eine **Sublimation**, wie sie z. B. der Schwefeldampf zeigt, der an kalten Flächen kleine monokline Oktaeder von der obenstehenden Form absetzt. Schmilzt man sie dagegen, so setzen sich bei der Erkaltung unter geeigneten Versuchsbedingungen an den Wänden des Gefäßes rhombische Kristalle ab, die unten abgebildet sind. Aus halben Oktaedern der ersten Form würde man Rhomboeder der zweiten Form zusammensetzen können.

Während wir beim Schwefel und beim Wasser die Substanzen sich aus ihrem eigenen flüssigen oder gasförmigen Zustand herauskristallisieren ließen, wendet man oft dazu ihre **Lösungen**, meist in Wasser, aber zuweilen auch in anderen Flüssigkeiten, wie Alkohol u. s. w., an. Es ist bekannt, daß warme Flüssigkeiten mehr Lösungsvermögen haben als kalte. Läßt man demnach eine im warmen Zustand gesättigte Lösung erkalten, so scheidet sich ein Teil des gelösten Stoffes aus, und dies geschieht immer in Kristallform. Erkaltet die Lösung sehr schnell und bewegt man sie dabei durch Umrühren, so geht die Kristallisation in allen ihren Teilen zugleich vor sich. Es entstehen sehr kleine, oft nur im Mikroskop als solche erkennbare Kristalle, ein **Kristallmehl**, während bei langsamem Erkalten und anderen Vorsichtsmaßregeln von manchen Stoffen sehr große Kristalle zu erhalten sind. Andere Stoffe liefern immer nur kleine Kristalle, namentlich die in dem betreffenden Mittel schwer löslichen Substanzen, die deshalb auch nur in geringen Mengen darin enthalten sind. Wie schon erwähnt, setzen sich die Kristalle mit Vorliebe an feste Körper, also zunächst an die Wände des Gefäßes, bilden sich aber nur teilweise aus und erscheinen wie durchgeschnitten von der Ansatzfläche, in deren Poren sie sich fest verwachsen. Ein Kristall setzt sich dabei auf den anderen, wächst aus ihm gleichsam hervor, so daß sich die mannigfaltigsten Gestalten bilden, deren geometrische Grundformen aber immer dieselben bleiben. Ineinander verwachsen können nur Kristalle derselben Form. Will man diese Form rein erhalten, so hat man ganz besondere Vorsichtsmaßregeln anzuwenden. Zunächst ist dem Kristall Gelegenheit zu geben, frei nach allen Seiten zu wachsen; man muß ihm also einen Kristallisationspunkt in der Mitte der Flüssigkeit schaffen, was am besten dadurch geschieht, daß man einen schon fertig gebildeten reinen Kristall derselben Form hineinhängt (s. die Abbildung, S. 544). Ein solcher fördert den Prozeß ungemein; er wächst gleichartig weiter, während geometrisch verschiedene Kristalle wirkungslos bleiben, außer daß sie als Ansatzpunkte wie jeder andere feste Körper dienen.


Rhombischer Kristall des geschmolzenen Schwefels.

Da jedes Element und jede Verbindung die ihnen eigene Kristallform hat, so kann aus einer Lösung, die verschiedene Substanzen enthält, jede derselben durch Auskristallisieren ganz rein erhalten werden. An einen Kristall der einen setzt sich niemals einer der anderen Substanz; noch weniger kristallisiert, mit gewissen Ausnahmen, jemals der eine Stoff in der Form des anderen. Allerdings kann es vorkommen, daß ein Kristall sich mechanisch mit anderen Stoffen verunreinigt und auch fremde Flüssigkeiten in geringen Mengen in sich aufnimmt, weshalb man, um ganz reine Stoffe zu erhalten, den Kristallisationsprozeß zu wiederholen pflegt, d. h. die zuerst gewonnenen Kristalle wieder löst und sie abermals kristallisiert. Dann aber erhält man die Stoffe in der denkbar reinsten Form. Da die verschiedenen Stoffe bei verschiedenen Temperaturen und Konzentrationen auskristallisieren, so kann man sie durch Kristallisation auch voneinander trennen. Nachdem der eine Stoff auskristallisiert ist, nennt man die übrigbleibende Lösung seine Mutterlauge, die gleichfalls kristallisiert. Geht dieser Prozeß bei zwei Stoffen unter gleichen physikalischen Bedingungen vor sich, so fallen die verschiedenen Kristalle zugleich nebeneinander aus der Lösung, ohne miteinander zu verwachsen. Später sortiert man sie nach ihrem geometrischen Charakter und trennt auf diese Weise beide Stoffe voneinander. Einen sehr interessanten Fall haben wir bei der Weinsäure schon wiederholt angeführt. Hier bildet ein und derselbe Stoff zwei, wenn auch nur sehr wenig voneinander verschiedene Kristalle gleichzeitig, die, sortiert und wieder gelöst, zwei optisch verschiedene Substanzen liefern (S. 477).



Ansetzen der Kristalle. Vgl. Text, S. 543.

Sehr lehrreich sind, wie meistens, die Ausnahmefälle von dieser sonst so allgemeinen Regel. Da es nämlich mehr kristallisierbare Substanzen gibt als deutlich unterschiedene Kristallformen, so scheiden manche chemisch verschiedene Substanzen in sehr ähnlichen Formen aus, wobei sich zeigt, daß sie auch zusammen kristallisieren, d. h. sogenannte Mischkristalle bilden, in denen bestimmte Prozentsätze von beiden Stoffen zugleich enthalten sind. Es ist ganz gleichgültig, ob die beiden Stoffe sich chemisch mehr oder weniger ähnlich sind, sie müssen nur in der Verbindung, um welche es sich handelt, chemisch indifferent sein, weil sie sonst schon in der Lösung nicht nebeneinander bestehen könnten. Hierdurch ist nun klargelegt, daß der Kristallisationsprozeß ein rein physikalischer ist, obwohl die Form der Kristalle von ihrer chemischen Zusammensetzung abhängt. Auch findet keine Volumveränderung bei der Mischung statt, also keine Zusammenziehung oder Ausdehnung, die immer eine chemische Anziehung verrät. Sind die Kristallformen der beiden Stoffe einander nur ähnlich, so bilden sie oft Mischkristalle von

einer zwischen beiden liegenden Form; sind z. B. die Winkel der betreffenden Kanten der beiden Kristallformen etwas verschieden, so erhält der Mischkristall einen an Graden zwischen beiden liegenden Winkel. In anderen Fällen zwingt auch die im Überschuß in der Lösung enthaltene Substanz die andere, ihre Kristallform anzunehmen, aber immer nur, wenn beide Formen einander geometrisch ähnlich sind. So hat z. B. das Magnesiumsulfat rhombische, das Eisensulfat monokline Kristalle. Ist das erstere in einer Lösung im Überschuß vorhanden, so kristallisiert auch das Eisensalz rhombisch mit aus, im anderen Falle das Magnesiumsalz monoklin.

Sehr eigentümlich ist die Eigenschaft des Wassers und einiger anderer Lösungsmittel, mit den verschiedensten Kristallformen Mischkristalle zu bilden, also mit jenen Stoffen gemeinsam in deren Form fest zu werden. Viele aus dem Wasser auskristallisierte Stoffe enthalten Kristallwasser, und zwar immer in bestimmtem molekularen Verhältnis. Zum Beispiel kristallisieren die beiden soeben genannten Stoffe Magnesium und Eisensulfat so aus, daß immer sieben Moleküle Wasser auf jedes ihrer eigenen Moleküle kommen. Ihre chemische Formel für den kristallinischen Zustand ist somit $MgSO_4 + 7H_2O$ und $FeSO_4 + 7H_2O$. Dieses Kristallwasser ist aber nur verhältnismäßig lose mit dem andern Stoffe verbunden, nur physikalisch, nicht chemisch, wie etwa in den Kohlehydraten. Durch Erhitzen kann man die Kristalle in ihrem eigenen Wasser auflösen und dieses durch Verdampfen entfernen, wonach eine unkristallisierte, amorphe, feste Masse übrigbleibt. Nur von diesem amorphen Zustand haben wir die Zusammensetzung der Stoffe bisher angegeben, auch wo, wie in den verschiedenen kristallinischen Gesteinen, das Kristallwasser mit ihnen unzertrennlich ist, solange sie die Gestalt und Eigenschaften jener Gesteine besitzen. Hier haben wir wieder einen Beweis, daß die Materie, in je niedere, dichtere Aggregatzustände sie tritt, um so größere Molekularverbände bildet, die um so leichter durch Temperaturwirkungen zu zerstören sind, je größere Moleküle angegriffen werden können. In den tieferen Stufen entstehen demnach bereits physikalische Verbindungen, also solche Verbände, die schon durch physikalische Einwirkung wieder zu lösen sind, und durch das kristallinische Gefüge verwebt sich die Materie derartig ineinander, daß sie ihre freie Beweglichkeit einbüßt, obgleich sie dabei nicht wesentlich dichter, in einzelnen Fällen sogar weniger dicht wird, als sie es im flüssigen Zustand war. Die ein Ganzes für sich bildenden, unter sich beweglichen Materievereinigungen, die Moleküle, sind im flüssigen Zustand wahrscheinlich meistens größer als im gasförmigen, aber kleiner als im festen Zustand, bei dem es sich allerdings wesentlich um physikalische, nicht chemische Vereinigungen handelt. Auch diese Molekularverbände werden noch meistens, wenn auch nicht immer, durch Wärmezufuhr getrennt, ebenso wie die Gasmoleküle bei der Dissoziation. Aber mehr und mehr treten hierbei die chemischen Kräfte in den Vordergrund und stellen den Wärmewirkungen Widerstand entgegen. Zweifellos zeigt das Kristallwasser diese Neigung der Materie, im festen Verband immer größere Moleküle zu bilden; wir sehen selbst zehn und mehr Moleküle Wasser mit nur einem des eigentlichen kristallbildenden Stoffes zusammentreten; so beim Glaubersalz $Na_2SO_4 + 10H_2O$, beim Borax $Na_2B_4O_7 + 10H_2O$ und bei der Soda $NaCO_3 + 10H_2O$. Bei der ersten Kristallverbindung ist sogar die Gewichtsmenge des das Kristallwasser mitnehmenden Stoffes kleiner als dieses selbst: ein Molekül Glaubersalz ohne Kristallwasser hat das Gewicht 142, während sein Kristallwasser allein an Gewicht 180 Wasserstoffatomen gleichkommt.

Die lose Verbindung der bei der Kristallisation mit festgewordenen Wassermoleküle geht auch daraus hervor, daß viele Kristalle ohne weiteres mit der Zeit ihr Wasser zum Teil an die Luft wieder abgeben, wodurch ihre kristallinische Form zerfällt; sie verwittern an der Luft.

Andere Stoffe dagegen geben einen Teil ihres Kristallwassers durch physikalische Einwirkungen überhaupt nicht wieder ab, ohne sich auch chemisch zu verändern; bei diesen muß also dieser Teil chemisch gebunden sein. Ein Beispiel hierfür bietet der **Kupfervitriol**, das bekannte Salz



Schneekristalle (vergrößert). Nach Glaisher. Vgl. Text, S. 547

mit seinen schönen blauen, triklinen Kristallen. Es enthält in diesem Zustande fünf Moleküle Wasser: $CuSO_4 + 5H_2O$. Wer jemals mit diesem Stoffe zu tun gehabt hat, weiß, daß er an der Luft verwittert, dabei aber zugleich auch seine Farbe verliert. Es bröckelt von den blauen Kristallen nach und nach ein weißes Pulver ab, das wasserfreies Kupfersulfat ist und schon durch seine verschiedene Farbe zeigt, daß es andere Eigenschaften hat als das kristallinische.

Die Entfernung des Wassers hat also seine Konstitution geändert, die indes sofort wiederkehrt, sobald man dieses weiße Pulver wieder in Wasser löst, das dadurch dieselbe blaue Farbe annimmt, als ob man jene blauen Kristalle darin gelöst hätte; aus ihm kann man diese nun wieder ausfällen.

Wasser hat also, neben noch wenigen anderen Flüssigkeiten, die sehr merkwürdige Eigenschaft, beim Festwerden die verschiedensten Kristallformen mit anzunehmen, während es, allein kristallisierend, wie alle anderen Stoffe seine bestimmte rhomboedrische oder hexagonale Kristallform immer wieder herstellt, wenn auch in den vielseitigsten Verzweigungen. Durch diese Grundform entstehen die reizenden sechseckigen **Schneesterne** (s. die Abbildung, S. 546), die sich immer weiter in jenem hexagonalen System verzweigen. Tyndall erzählt, daß er auf dem Wasser vollkommen regelmäßige sechsblätterige Blumen aus Eis schwimmend fand, die in der Mitte sogar einen Kelch hatten, wo eine luftleere Stelle entstanden war.

Eis ist im Grunde nichts anderes als eine kristallinische Felsart, wie etwa der Granit. Sein leichter Übergang in alle drei Aggregatzustände ist nur eine Folge der gegenwärtig auf unserem Weltkörper herrschenden Mitteltemperatur. Diese ist Schwankungen unterworfen und erniedrigt sich zweifellos allmählich, wodurch nach und nach andere Stoffe dazu gelangen können, die Rolle des Wassers zu übernehmen, das gegenwärtig das ganze Naturgetriebe auf der Erde beherrscht. Grundverschiedene geophysische Bedingungen würden dadurch eintreten. Im Hochgebirge und in den Polarregionen (s. die Abbildung, S. 549) kann man das Eis schon bei uns gesteinsbildend nennen, und in noch weit höherem Maße wird dies wahrscheinlich auf dem Monde der Fall sein. Bei sehr großer Kälte wird Eis so hart, daß man an ihm wie an den härtesten Steinen Funken schlagen kann. Ähnliches ist mit allen anderen Stoffen der Fall; das geschmeidige Blei wird in großer Kälte brüchig, Butter zersplittert wie Glas.

Nach allen unseren Erfahrungen ist kein Zweifel, daß die **Kristallform ein sichtbarer Ausdruck für die unsichtbare Form der Moleküle** der verschiedenen Verbindungen oder Elemente ist, deren Atome durch ihre eigentümlichen Beziehungen zueinander, die wir ihre Valenzen nannten, klar ihren verschiedenen körperlichen Bau verraten. Es ist selbstverständlich, daß die Form der Kristalle nicht unbedingt oder nur in den wenigsten Fällen eine bloße Vergrößerung der Form jener Atome oder Moleküle sein wird, aber wir müssen es doch für wahrscheinlich erklären, daß geometrisch klar bestimmte Teilungen der Atome als Raumelemente auftreten, deren Aneinanderfügung dann die betreffende Kristallform herstellt. Wie verschieden diese den Raumelementen gegenüber sein kann, sehen wir am Eis, das einerseits jene wundervollen Schneesterne, dann die Eisblumen und schließlich kompakte Tafeln bildet, an denen man nur noch schwer irgend eine Struktur erkennt. Hier steht noch ein großes und schwieriges Feld für den Mathematiker offen, der alle Möglichkeiten von Kombinationen der betreffenden Körperformen aus den einfachsten Elementen darzustellen hat.

Einige Regeln wird man ohne weiteres aus den vorangegangenen Betrachtungen vorhersagen können. Die Moleküle sind körperliche Gruppierungen der Atome. Es ist also vorauszusehen, daß auch die Körperformen der Moleküle im allgemeinen künstlicher aufgebaut sein werden, je vielseitiger ihr chemischer Aufbau ist. **Die Elemente werden einfachere Kristallformen aufweisen als ihre Verbindungen.** Dies hat die Forschung bestätigt:

Retgers hat 1894 eine Zusammenstellung in dieser Hinsicht gemacht, aus der z. B. hervorgeht, daß unter 40 Elementen, die als solche kristallinisch zu beobachten sind, 20 im regulären System, 14 hexagonal, dagegen nur je 2 tetragonal, rhombisch und monoklin kristallisieren und keine einzige triklin. Wir sehen also die Kristallformen mit gleichgroßen und sich im rechten

Winkel schneidenden Hauptachsen ganz entschieden vorherrschen; von der tetragonalen Form, die eine größere oder kleinere dritte Achse hat, während aber noch alle drei Achsen senkrecht aufeinander stehen, ferner der rhombischen Form, in der bei gleicher Stellung der Achsen doch alle drei verschieden lang sind, und endlich der monoklinen, bei der eine Achse zu den anderen schief steht, kommen nur je zwei Fälle vor, gar keiner von der unregelmäßigsten Klasse der Kristallformen, der triklinen.

Von 67 Stoffen, bei denen zwei verschiedene Atome zu einem Molekül zusammengetreten sind, kristallisieren 46 regulär und 13 hexagonal, je 3, 2 und 3 in den oben genannten drei anderen Systemen und abermals keiner triklin. Faßt man die regulären und die hexagonalen Formen zusammen, so ergibt sich, daß von den ein- und zweiatomigen Stoffen etwa 86 Prozent in diesen Formen und nur 14 Prozent in den anderen kristallisieren. Bei den aus drei Atomen bestehenden Molekülen verschiebt sich indes bereits das Verhältnis mehr zu gunsten der weniger symmetrisch gebauten Formen: die Prozentzahlen werden 53 und 47. Bei den vieratomigen Verbindungen kommen wir schon auf 40 und 60 für diese Verhältniszahlen. Bei den fünfatomigen Stoffen scheint das Verhältnis wieder etwas besser zu werden: 50 zu 50; es kommt unter diesen sowohl wie unter den dreiatomigen je eine trikline Form vor. Aber nun wird bei den verwickelter gebauten Molekülen auch der Bau der Kristalle gleichfalls verwickelter. Unter 673 unorganischen Substanzen mit mehr als fünf Atomen im Molekül sind die unsymmetrischeren Kristalle im Übergewicht: es sind unter ihnen nur noch 20 Prozent reguläre und hexagonale gegen 80 Prozent der anderen Klassen, und noch schärfer tritt dies Übergewicht in den organischen Verbindungen hervor, deren Bau ja noch wesentlich verwickelter ist als der der anorganischen. Hier werden die Prozentzahlen gar 6 zu 94. Unter 585 untersuchten Substanzen kommen nur noch 15 reguläre und 24 hexagonale Kristalle vor. Wir haben hier einen ganz unverkennbaren Parallelismus zwischen dem molekularen und dem kristallinischen Bau der Materie. Aber es muß dieser Gegenstand noch eingehender studiert werden, ehe man in dieser Hinsicht bestimmte Gesetzmäßigkeiten nachweisen kann, die gerade hier, wo man streng umschriebene geometrische Formen als Ausdruck dieser Gesetzmäßigkeiten vor sich hat, mit größerer Sicherheit zu finden sein werden, als es in irgend einem anderen Gebiet der chemisch-physikalischen Beziehungen zu erwarten ist. Diese Gesetze sind von grundlegender Wichtigkeit für die ganze Theorie der molekularen Bewegungen, weil sie uns die wahre Form jener kleinsten Weltkörper verraten müssen, deren Bewegungen wir einst nach denselben Gesetzen rechnerisch zu beherrschen hoffen wie die der Welt der Himmelskörper. Es unterliegt heute schon keinem Zweifel, daß jene molekularen Weltkörper von den makroskopischen sehr verschiedene Formen haben, deren Einfluß die mechanische Theorie der Moleküle viel verwickelter machen muß, als die wahrlich schon genügend verwickelte Mechanik des Himmels es ist, wo wir es nur mit kugelförmigen oder allenfalls ellipsoiden Körpern zu tun haben, zwischen denen große Abstände liegen.

Bei unseren physikalischen Betrachtungen haben wir häufig Eigenschaften der Kristalle anführen müssen und können alle hierauf bezüglichen Erfahrungen dahin zusammenfassen, daß überhaupt alle physikalischen Eigenschaften der Kristalle nach den Richtungen ihrer Achsen orientiert sind. Sowohl die Spannungsverhältnisse bei Druck oder Ausdehnung wie die der Wärmeleitung, des Lichtes und der Elektrizität richten sich nach der Kristallform in der Art, daß man eine Schichtung der Materie in einer ganz bestimmten Ordnung annehmen muß, die mit der geometrischen Form des Kristalls in unmittelbarer Beziehung steht.

Alle physikalischen Kräfte, die bewegend auf die Materie wirken, wie die Wärme und die Elektrizität, strahlen von einem Kristall in der Weise aus, daß neue Materie, die überhaupt in der Lage ist, sich den Kristallen anzuschließen, dies nur in jenen Richtungen tun kann, in welchen bereits die Materie in den vorhandenen Kristallen geordnet ist, d. h. der Kristall kann nur in seiner eigenen Form weiter wachsen. Diese beobachtete Tatsache erklärt sich aus den ebenfalls beobachteten physikalischen Eigenschaften der Kristalle. Wir verstehen danach, daß ein Kristall, der in eine mit seiner Zusammensetzung übereinstimmende Lösung getaucht wird, weiter wächst und überhaupt die weitere Kristallisation unterstützt, und weiter, daß es diesen rein physikalischen Kräften gleichgültig ist, wie die sich ankristallisierenden Stoffe chemisch zusammengesetzt



Gesteinbildendes Polareis. Die große Eismauer nördlich vom Mount Terror, Antarktis. Nach Sievers, „Australien und Ozeanien“. Vgl. Text, S. 547.

sind, wenn ihre körperlichen Eigenschaften nur die Zusammenfügung nach der vorliegenden Form möglich machen; d. h. es werden Mischkristalle entstehen, in denen verschiedene Stoffe in gleicher Form kristallinisch vereinigt sind. Das Fehlen der Mischkristalle von beliebigen flüssigen Mischungen zeigt wieder auf das deutlichste, daß die Form der Moleküle in einem ganz bestimmten Zusammenhang mit der Kristallform stehen muß, denn sonst müßte ja jeder vorhandene Kristall vermöge der ihm innewohnenden Kräfte jede sonst zur Kristallisation reife Substanz auch in seiner Form mit sich vereinigen. Aber ebensowenig, wie man aus Würfeln jemals eine Figur zusammensetzen kann, deren Querschnitt ein Dreieck ist, ebensowenig läßt sich etwa Kochsalz mit Kupfervitriol zu Mischkristallen vereinigen.

Diese beobachtete Abhängigkeit des Einflusses der physikalischen Kräfte von der chemischen Beschaffenheit der kristallisierenden Stoffe ist eigentlich nur eine rein äußerliche, von der äußeren Körperform allein abhängige, die in dem einen Fall den Weiterbau des Kristalles nach dem gleichen Grundriß, wenn wir uns so ausdrücken dürfen, wegen der gleichen oder doch sehr

ähnlichen Form der zur Verfügung gestellten Bausteine möglich macht, im andern nicht. Setzen wir aber das Vorhandensein dieser bestimmt geformten Bausteine überall da voraus, wo die Atome sich zu jenen Verbindungen zusammengefunden haben, so bestehen die gebildeten Moleküle ja auch schon aus solchen Kristallen oder Kristallelementen von gleicher Wirkung, wie sie jene größeren Kristalle schuf, deren Eintauchen den Kristallisationsprozeß in uns durchaus verständlicher Weise beginnen ließ. Das heißt aber nichts weiter, als daß die Kristallisation immer beginnen muß, wenn durch die physikalischen Verhältnisse eine genügende Annäherung ermöglicht wird, damit die Anziehungskräfte jener molekularen Kristalle in Wirkung treten können. Alle uns bekannten physikalischen Eigenschaften der Kristalle sind demnach nur eine Folge der Körperformen ihrer Moleküle. Immer wieder kommen wir zu dem Schlusse, daß die geometrischen Eigenschaften der Raumausfüllung und Bewegung der Materie alle Gesetze ihrer in Erscheinung tretenden Eigenschaften enthalten müssen.

Da also diese Eigenschaften der Kristalle nur von der Gruppierung der Moleküle abhängen, die zwar im festen Zustand der Materie am sichersten festzuhalten ist, aber auch im flüssigen noch bis zu einer gewissen Grenze bestehen bleiben kann, so ist das Vorhandensein flüssiger Kristalle von vornherein nicht ausgeschlossen.

Eine Anzahl von Flüssigkeiten organischer Herkunft zeigt, wie wir schon auf Seite 477 bei der Weinsäure erfahren haben, optische Eigenschaften, z. B. ein Drehungsvermögen der Polarisationsebene, die sonst nur wirklichen Kristallen zukommt; wir haben dies auch bei den Zuckerlösungen beobachtet. Diese Eigenschaft beweist aufs neue das Vorhandensein kleinster Kristalle von molekularen Dimensionen in diesen Flüssigkeiten, mit anderen Worten die kristallinische Form ihrer Moleküle. Es sind nun in neuerer Zeit sogar doppeltbrechende Flüssigkeiten entdeckt worden, bei denen es sich zeigte, daß ihre einzelnen Tropfen die Struktur von sogenannten Sphärokristallen haben müssen, bei denen die Materie strahlenförmig angeordnet ist (O. Lehmann) und damit doppeltbrechende Eigenschaften erhält. Die Flüssigkeit ist in diesem Zustand trübe, als ob Beimengungen von kleinsten Dimensionen, Emulsionen, ihre Durchsichtigkeit beeinträchtigten. Erwärmt, wird die Flüssigkeit klar und verliert ihre ungewöhnlichen optischen Eigenschaften. Es ist also kaum ein Zweifel, daß die Trübung von kleinsten Kristallen herrührt, die für sich wohl fest sein können, aber den flüssigen Charakter der Substanz dadurch nicht verändern und bei Erwärmung schmelzen.

In den Organismen endlich kommen, wie wir schon anführten, kleine weiche Kristalle, Kristalloide genannt, vor, die elastisch jedem Druck nachgeben, aber immer wieder ihre Form annehmen. Auch sie sind zweifellos durch dieselben Eigenschaften der Materie wie die gewöhnlichen Kristalle entstanden, indem sich die durch die Form der Moleküle auch schon im flüssigen Zustande bevorzugte Gruppierung langsam bis zu jenem eigentümlichen „kolloidalen" Zustand verdichtete, der so vielen organischen Substanzen eigen ist.

Dieser kolloidale, leimartige Zustand, der als ein Zwischenglied vom flüssigen zum festen Zustand zu betrachten ist, soll uns hier zunächst beschäftigen, ehe wir die Eigenschaften der eigentlichen festen Körper weiter kennen lernen. Die leimartigen Körper treten, wenn wir von jenen rätselhaften organischen Kristallen absehen, mit allen übrigen in Gegensatz dadurch, daß ihre Lösungen nicht kristallisationsfähig sind, sondern statt dessen in jenen eigentümlichen Zustand übergehen, den wir gallertartig nennen, und der uns bei der Gelatine und im gequollenen Leim bekannt ist. Man könnte deshalb alle Körper überhaupt in zwei streng getrennte Klassen, die kristallbildenden und die gelatinösen, einteilen. Jener Zustand der Gallerte hat

ein merkwürdiges Gemisch von flüssigen und festen Eigenschaften. Die die Gallerte zusammensetzenden kleinsten Teile sind wohl bis zu einem gewissen Grade leicht gegeneinander verschiebbar und setzen kaum einen wesentlich größeren Widerstand entgegen, als etwa breiartige Lösungen. Nachdem aber der Druck entfernt ist, kehren die Teilchen wieder in ihre frühere Stelle zurück, ihr Gefüge hat also ausgesprochen *elastische Eigenschaften*. Da die einzelnen Teile unter normalen Verhältnissen ihre gegenseitige Lage nicht ändern, muß man die aus ihnen gebildeten Stoffe als feste bezeichnen; *die Gallerten sind demnach sehr wenig dichte, feste, elastische Körper*. Nicht nur *organische Substanzen* wie Stärke, Gummi, Dextrin, Leim, Eiweiß, Tannin zeigen in ihren Lösungen solchen gallertartigen Zustand, sondern er ist auch bei *unorganischen* zu finden, wie bei der Kieselsäure, Tonerde, bei Eisenoxyd, Schwefelantimon, Schwefelkupfer, Silber und Platin.

Es ist ausgeschlossen, daß dieser Zustand ein Übergang vom flüssigen in den festen Zustand ist, der mehr oder weniger stabil oder unvollständig beim Erstarren jeder Lösung eintritt, wenn man sie etwa am Kristallisieren verhindern würde; vielmehr müssen hier ganz besondere molekulare Wirkungen stattfinden, die nur den betreffenden Stoffen eigen sind und uns deshalb besonders interessieren, weil sie den Einblick in das molekulare Gefüge der Materie weiter zu vertiefen versprechen. Dazu bieten wieder unsere Erfahrungen mit den verdünnten Lösungen eine vortreffliche Handhabe. Wir sahen ja, daß der bei ihnen beobachtete osmotische Druck uns eine sichere Auskunft über die Größe der Moleküle gibt. Stellt man z. B. eine *wässerige Lösung* von Gummi, etwa von 1 Prozent, her, so ist an ihr von jenem gallertartigen Zustande noch durchaus nichts zu bemerken; die Lösung ist eine Flüssigkeit wie jede andere. Und doch unterscheidet sie sich wesentlich von einer solchen durch ihren sehr *geringen osmotischen Druck*, mit dem wieder parallel eine unbedeutende Erniedrigung des Gefrierpunktes geht (s. S. 181). Vergleicht man diese Beobachtungsergebnisse mit denen einer entsprechenden Zuckerlösung, so kann man daraus das Verhältnis der Molekulargewichte beider Stoffe finden. Dabei ergibt sich die merkwürdige Tatsache, daß die kolloidalen Körper sich aus sehr großen Molekülen zusammensetzen. Gummi hat z. B. das Molekulargewicht 3500, Eiweiß 14,000, Stärke 25,000, Kieselsäure sogar 49,000. Hierbei ist wohl zu beachten, daß diese Zahlen für die Körper in ihren verdünnten Lösungen, nicht etwa in ihrem erstarrten, gallertartigen Zustand gelten. Sollte man angesichts dieser großen Zahlen auf den Gedanken kommen, daß es sich bei diesen Stoffen um etwas einer Emulsion Ähnliches handelte, bei der sehr kleine, aber doch mikroskopisch noch wahrnehmbare Teile des einen Stoffes im anderen suspendiert sind, so möge man sich daran erinnern, daß ein Wasserstoffatom nur $8{,}2 \times 10^{-22}$ Milligramm wiegt, woraus hervorgeht, daß von den kolloidalen Kieselsäuremolekülen mit dem Gewicht 49,000 immer erst 25,000 Billionen (25 mit 15 Nullen) auf ein Milligramm gehen. Immerhin aber sind so große Molekularverbände bei keinem kristallisierenden Körper auch nur annähernd ermittelt worden. *Auch hier wieder sehen wir die Tendenz der Materie, sich zu größeren Systemen zu vereinigen.*

Erstarrt eine kolloidale Lösung zu einer *Gallerte*, so treten diese Moleküle offenbar in ganz eigentümliche Beziehungen zueinander, die vielleicht eine Art von Gewebe bilden, das hier an Stelle der kristallinischen Struktur tritt. Dieses „Gewebe“ macht sie einerseits elastisch, anderseits entsteht durch die kapillaren Wirkungen eine saugende Kraft dieser Stoffe; sie quellen im Wasser auf. Diese Kraft ist außerordentlich groß; es ist dieselbe, mit der Holz, das sich voll Wasser saugt, den härtesten Stein zersprengt. Das Auskristallisieren von

Geweben, wenn wir es so bezeichnen dürfen, das der Stärke und dem Eiweiß, den organischen Gewebstoffen eigen ist, beobachten wir also auch in der unorganisierten Natur. Fassen wir die Erscheinung wirklich als eine besondere Art von sehr feiner Verflechtung etwa nadelförmiger Kristalle auf, wie wir sie auch bei den Eisblumen wahrnehmen, so hätten wir einen der wichtigsten physiologischen Vorgänge mechanisch erklärbar gemacht.

Auch noch eine andere Eigentümlichkeit der Kolloide spielt eine hervorragende Rolle bei den Lebenserscheinungen. Von ihnen hergestellte „halbdurchlässige Wände" (S. 533) lassen nämlich keine Moleküle eines gelösten Kolloids, wohl aber jede andere Lösung durch. Die Struktur des kolloidalen Gewebes ist also zu fein, um die sehr großen Moleküle analoger Stoffe noch diffundieren zu lassen. Solche Gewebe sind aber die organisierten Zellwände, die diejenigen Stoffe durchsieben, die für das weitere Wachstum der Zelle verwendbar sind, dagegen die kolloidalen Stoffe draußen lassen, um allenfalls die Zellwände selbst zu verstärken.

Zwischen dem kristallinischen und dem kolloidalen Zustand liegt der sogenannte amorphe, bei dem man keine besondere Struktur wahrnehmen kann. Es ist indes wohl möglich, daß er zuweilen ein sehr starrer gallertartiger ist, was z. B. in den Eigenschaften des Glases deutlich hervortritt. Glas teilt alle Eigenschaften einer Gallerte, es ist namentlich außerordentlich elastisch wie eine solche. Nur die größere Dichte der Masse unterscheidet Glas physikalisch von einer Gelatine. Da aber optisch Glas alle Eigenschaften eines Kristalles, und zwar eines der regulären Form, hat, so haben wir hier eine weitere Wahrscheinlichkeit dafür, daß jener kolloidale Zustand wirklich auf einem kristallinischen Gewebe beruht. Glas enthält bekanntlich zum größten Teil Kieselsäure, die in ihrer in Wasser löslichen Form (Wasserglas) ein vollkommenes Kolloid mit sehr großen Molekülen bildet.

Die nicht kristallinischen, festen, also die amorphen Körper haben in Bezug auf ihre Festigkeit sehr verschiedene Eigenschaften; einige sind bei gleicher oder ähnlicher Dichte sehr fest und brüchig, spröde, andere fest, aber deutlich elastisch, wieder andere biegsam, geschmeidig. Diese Verschiedenartigkeit ließe sich vielleicht dadurch erklären, daß diese Stoffe Gemische von kolloidaler und kristallinischer Substanz sind. Die Brüchigkeit spricht hauptsächlich für einen kristallinischen Charakter; auch die Bruchstellen bei vielen solchen Körpern verraten deutlich kristallinische Struktur. Die biegsamen Körper, z. B. Blei, beständen nach dieser Theorie aus einem kolloidalen Zellgewebe, in welchem flüssiges Blei festgehalten wird. Daß dieses auch unter seinem Schmelzpunkt noch flüssig bleibt, erklärt sich daraus, daß durch den starken Druck, dem das Blei durch die Kapillarität in dem Gewebe ausgesetzt ist, sein Schmelzpunkt erniedrigt wird. Bei noch anderen Stoffen mag der kolloidale Teil der Substanz vorherrschen; diese bleiben trotz ihrer großen Dichte elastisch, wie Stahl und andere Metalle. Nach dieser Auffassung wäre also gerade jener amorphe Zustand, den man auf den ersten Anschein hin als den einfacheren dem kristallinischen gegenüber erklären möchte, der verwickeltste in Bezug auf die Anordnung der ihn bildenden kleinsten Materieteilchen. Jedenfalls wird es kaum möglich sein, eine einfache Erklärung für die verschiedenartigen Eigenschaften der Massen zu finden, die durch geeignete Behandlung und geringe Beimengungen in ein und demselben Körper ineinander übergehen können, wie wir es bei der Verwandlung des Eisens in weiches Schmiedeeisen einerseits und harten, elastischen Stahl anderseits beobachteten (s. S. 438). In vielen Fällen, so bei den kristallinischen Gesteinen, sieht man deutlich Kristalle in den amorph geschmolzenen Massen eingelagert. Man hat gemeint, hier einen unterbrochenen Kristallisationsprozeß annehmen zu müssen; aber es ist nicht ausgeschlossen, daß unter den abnormen Verhältnissen,

unter denen z. B. der Granit sich seit ungezählten Jahrmillionen befindet, sich der Kristallisationsprozeß in dem festen Gestein selbst vollzogen hat, da der Zustand der Materie im Erdinnern unter den extremen Druck- und Temperaturverhältnissen als ein zähflüssiger zu betrachten ist, in dem den benachbarten Molekülen eine zwar sehr geringe, aber doch im Laufe der Jahrtausende merklich werdende Bewegungsfreiheit bleibt, so daß auch diejenigen Molekularkräfte in Wirkung treten können, die den Kristallisationsprozeß hervorrufen. Trotz des kristallinischen Charakters der sogenannten Urgesteine ist es darum nicht ausgeschlossen, daß sie ursprünglich aus Meeren abgelagerte Sedimente waren, wie die höheren Schichten, und ihre kristallinische Form erst annahmen, nachdem sie sehr lange tief im Erdinnern eingebettet waren. Es sind von den Geologen manche Gründe für die sedimentäre Natur der Urgesteine aufgebracht worden, und sehr oft scheinen wirklich noch Spuren von Schichtung nachweisbar zu sein. Anderseits trifft man offenbare Sedimentschichten gelegentlich durch den Gesteinsdruck so vollständig zermalmt an, daß von ihrem Ablagerungscharakter nichts mehr zu erkennen ist.

Eine eigentümliche Stellung nimmt auch der metallische Zustand ein. Er ist so augenfällig, daß jedermann ein Metall von einem Nichtmetall unterscheiden kann, wenn man von den wenigen Übergängen absieht. Das in die Augen Springende ist hier der Metallglanz, der eine Folge des sehr großen Lichtabsorptions- und Reflexionsvermögens dieser Körper ist. Alle Metalle sind in weit höherem Grad undurchsichtig, d. h. absorbieren, bez. reflektieren das Licht vollkommener als die Nichtmetalle. Sehr dünne metallische Schichten sind schon undurchsichtig oder lassen nur in geringem Grade bestimmte Farben durch, deren Komplementärfarbe sich dem Metallglanz beimischt. Diese Lichtabsorption hängt eng zusammen mit dem elektrischen Verhalten der Metalle, das uns erst in einem der nächsten Kapitel (8) beschäftigen soll. Wir wissen aber bereits, daß auch in dieser Hinsicht sich die Metalle deutlich von den anderen Körpern unterscheiden.

Das chemische Verhalten der Metalle gegenüber den Metalloiden ist im zweiten Kapitel des vorigen Hauptabschnittes genügend charakterisiert worden. Es möge noch hinzugefügt werden, daß Körper der einen Klasse mit solchen der anderen nicht in ein einfaches Lösungsverhältnis treten, das nicht eine unzweifelhafte chemische Verbindung wäre; wohl aber mischen sich Metalle und Metalloide unter sich vielfach in beliebigen Verhältnissen. Bei den Metallen nannten wir diese Mischungen Legierungen, mit denen wir uns wiederholt beschäftigt haben. Es löst sich Zink in Kupfer, Weingeist in Wasser, aber niemals Zink oder Kupfer in Weingeist oder Wasser. Selbstverständlich erstreckt sich dies nicht auf die Verbindungen dieser Körper, denn die Metallsalze lösen sich meist sehr gut in Wasser.

Gehen die Metalle in den gasförmigen Zustand über, so verlieren sie die optischen und elektrischen Eigenschaften, die sie als metallisch charakterisierten. Der metallische Zustand ist in der molekularen Struktur ihres flüssigen oder festen Verbandes begründet. Wir werden erst völlige Klarheit über ihn gewinnen, wenn der amorphe Zustand in allen seinen Eigenschaftsstufen der Erklärung keine Schwierigkeiten mehr entgegenstellt, denn der metallische Zustand ist möglicherweise als ein Gemisch von kristallinischer und amorpher Struktur zu betrachten.

Wir haben nun die Materie abermals, wie schon bei unseren physikalischen Betrachtungen im ersten Teil dieses Werkes, durch alle ihre Aggregatzustände verfolgt, die ihr von den verschiedenen Temperaturgraden, unter denen sie sich befindet, aufgedrängt werden; aber wir haben in diesem Abschnitt die chemische Natur der Stoffe in den Vordergrund gestellt, die

uns im vorangegangenen Abschnitt noch nicht bekannt war. Dabei wurde klar, daß zwar mit großer Wahrscheinlichkeit alle bekannten Stoffe bei genügend veränderter Temperatur alle Aggregatzustände annehmen können, daß aber die Wärmemenge, die damit den betreffenden Stoffen zugeführt oder entnommen werden muß, sehr verschieden ist und sich nach Größe und Gruppierungsart der Atomansammlungen richtet, die wir Moleküle nannten. Da Entziehung oder Hinzufügung von Wärme gleichbedeutend mit entsprechenden Veränderungen des Energievorrates der Körper ist, so geben die chemischen und physikalischen Zustandsänderungen Aufschluß über die Änderungen der Gesamtenergie, die in den molekularen Systemen bei diesen Vorgängen stattfinden. Nur ein Teil dieser Energiesumme ist unter gewöhnlichen Umständen unserer Beobachtung zugänglich, während die Energie der innermolekularen Vorgänge nur auf indirekten Wegen zu erforschen ist. Deshalb bieten gerade hier die chemischen Erscheinungen eine sehr wichtige Handhabe. Aus allen vorangegangenen Erfahrungen kann man nun die folgenden von Berthelot aufgestellten thermochemischen Grundsätze ableiten:

1) Die bei irgend einer Reaktion entwickelte Wärmemenge ist ein Maß für die Summe der dabei geleisteten chemischen und physikalischen Arbeiten.

2) Wenn ein System einfacher oder zusammengesetzter Körper unter bestimmten Verhältnissen gegeben ist, aber physikalische oder chemische Änderungen erfährt, die es in einen neuen Zustand überführen, ohne daß dabei äußere mechanische Wirkungen ausgeübt werden, so hängt die bei diesen Änderungen hervorgebrachte oder absorbierte Wärmemenge einzig und allein von dem Anfangs- und dem Endzustand des Systems ab, ist aber unabhängig von der Art und der Reihenfolge der Zwischenzustände.

3) Jede chemische Änderung, die sich ohne Eingriff einer fremden Energie vollzieht, strebt zur Bildung desjenigen Körpers oder desjenigen Körpersystems, welches am meisten Wärme freimacht.

Der erste und zweite dieser Sätze folgt unmittelbar aus dem oberſten Prinzip von der Erhaltung der Kraft. Denn würde die entwickelte Wärmemenge nicht im Verhältnis zu den geleisteten Arbeiten stehen, so müßte sie sich zum Teil irgendwie selbständig bilden. Oder würden bei einer Reihe von Prozessen, wenn der Endzustand dem Anfangszustand wieder gleich ist, also keine Wärme im ganzen entwickelt oder verbraucht wurde, die verwendeten Wärmemengen sich nicht aufheben, so müßte ja der Überschuß an Wärme aus nichts entstanden oder ein Verlust an Wärme durch ein Nichts ersetzt sein. Dieses sogenannte Gesetz der konstanten Wärmesummen findet übrigens manche wichtige Anwendungen bei theoretischen Untersuchungen. Es wurde bereits 1840 von Heß gefunden, also zu einer Zeit, als jenes oberste Gesetz von der Erhaltung der Kraft noch nicht ausgesprochen war, obwohl es damals gewissermaßen schon überall in der Luft lag. Diese beiden Sätze besagen also weiter nichts, als was sicher vorauszubestimmen war, daß nämlich auch die chemischen Vorgänge sich durchaus den allgemeinen Gesetzen unterwerfen, die wir bei den physikalischen Vorgängen überall bestätigt fanden; d. h. auch alle chemischen Prozesse sind in letzter Linie physikalischer Natur, und es gibt keinen prinzipiellen Unterschied zwischen beiden Klassen von Erscheinungen, wie verschieden sie auch zuweilen uns entgegentreten.

Der dritte Satz deckt sich mit unseren physikalischen Erfahrungen über die beständige Abnahme der inneren Energie, der Spannkraft, des Potentials, zu gunsten der geleisteten

äußeren Arbeit. Es ist der Satz von der stetig zunehmenden „Entropie" des Weltalls. Ebenso wie wir die Systeme der Weltkörper sich immer vergrößern, die Materie sich immer weiter verdichten sahen, wie wir erkannten, daß Wärme immer nur von einem wärmeren zu einem kälteren Körper übergehen kann, so zeigt sich auch in allen chemischen Vorgängen ein Bestreben, immer größere Vereinigungen von Atomen, immer größere Moleküle und Molekularverbände zu bilden; diese entstehen unter Entbindung von Wärme, die anderweitig verwendet wird, also zu einer Rückbildung, zu einer Lösung der entstandenen Verbindungen nur teilweise wieder benutzt werden kann. Seit die Erde besteht, verbanden sich ungeheuere Mengen von Sauerstoff mit den anderen chemischen Elementen, oxydierten sie unter Wärmeentwickelung, aber verhältnismäßig sehr geringe Mengen des Lebensgases werden wieder in Freiheit gesetzt. Die Temperatur unseres Weltkörpers und die aller anderen sinkt, wenigstens im allgemeinen, in der Summe der Wirkungen, beständig, denn sie müssen ihre Wärmemengen an den kalten Weltraum abgeben. Infolgedessen können chemische Verbindungen stufenweise nur mit immer größeren und dichteren Molekülen vor sich gehen. Auch diese allerkleinsten Weltsysteme sehen wir also allmählich gleichen Zielen zustreben wie die großen Himmelskörper. Es ist zwischen beiden kein prinzipieller Unterschied. Welche letzten Konsequenzen von einer allmählichen Verlangsamung und schließlich vom Absterben aller Lebensregung im gesamten Umfang des Universums man hierauf glaubte aufbauen zu müssen, ist uns gleichfalls bekannt (S. 200). Wir kommen am Schlusse des Werkes darauf zurück.

7. Chemischer Zustand und Licht.

a) Einfluß des chemischen Zustandes auf das Licht.

Da wir schon in unserem physikalischen Abschnitt erfahren haben, daß strahlende Wärme und Licht ein und dieselbe Bewegungserscheinung des Äthers ist (S. 195), so können wir von vornherein voraussetzen, daß die Beziehungen der chemischen Erscheinungen zum Licht im Wesen dieselben sein müssen wie die zur Wärme, obgleich sie wegen des sehr großen Wechsels der vom Licht und von der Wärme übertragenen Energiemengen in der Wirkungsgröße verschieden ausfallen. Die verhältnismäßig groben Schwingungsbewegungen der Wärme greifen den molekularen Bau der chemischen Systeme wesentlich kräftiger an als die so sehr feinen Schwingungen des Lichtes. Anderseits vermögen diese wegen ihrer Kleinheit leichter als die Wärmestrahlen bis in die zartesten Maschen des Atomgewebes der Materie einzudringen.

Wollen wir diese Wechselwirkungen verfolgen, so haben wir sie in zwei Hauptgruppen zu zerlegen; einmal sind die Veränderungen zu betrachten, die der besondere molekulare Bau der Materie, wie wir ihn kennen gelernt haben, auf ihn durchdringende, von ihm zurückgeworfene oder selbst erzeugte Lichtwellen hervorbringt, und anderseits ist umgekehrt von den Wirkungen zu sprechen, die das Licht nach dem Prinzip der Wirkung und Gegenwirkung dabei auf den molekularen Bau ausübt.

Von der ersten Reihe von Wirkungen haben wir bereits bei unseren physikalischen Betrachtungen vielfach reden müssen. Alle optischen Eigenschaften zeigten sich abhängig von der materiellen Beschaffenheit der betreffenden Substanzen. Nur deshalb konnte das Spektroskop zu einem Werkzeug der chemischen Analyse werden und sich eine Spektralanalyse bilden. Wir

haben uns mit dieser bereits eingehend beschäftigt, soweit aus ihren Erscheinungen allgemeine optische Gesetze abzuleiten oder zu bestätigen waren. Im Anschluß haben wir an dieser Stelle danach zu suchen, ob Beziehungen zwischen dem Spektralcharakter und dem molekularen Bau aufzufinden sind. Wenn die Wellenbewegungen des Lichtes wirklich durch die Schwingungen der Moleküle und der Atome in den molekularen Systemen hervorgebracht werden oder eine Veränderung erfahren, indem sich ihre Bahnbewegungen den die Systeme durchdringenden Ätheratomen mitteilen, so müssen unbedingt die Lichtschwingungen ein treues Abbild jenes molekularen Aufbaues sein, und die optischen Untersuchungen werden geradezu das sicherste Mittel bieten, Aufschlüsse über die Konstitution dieser allerkleinsten Weltsysteme zu gewinnen.

Leider ist es der noch so jungen Forschung auf diesem interessanten Gebiete bisher nur mit sehr geringem Erfolg gelungen, in dem Gewirr von Einzelerscheinungen leitende Fäden zu finden, die zum Ziele führen könnten. Denn man wolle sich erinnern, daß viele chemischen Elemente Hunderte und selbst Tausende von Spektrallinien zeigen. Was man aber nach dieser Richtung bereits entdeckt hat, bestätigt wiederum sehr schön unsere gewonnenen Anschauungen von dieser unsichtbaren Welt von Welten, in welche das Spektroskop uns einen Einblick zu gewähren beginnt.

Steht also Zahl und Lage der Spektrallinien in einem unmittelbaren Zusammenhang mit dem molekularen Bau, so muß es auf den ersten Blick befremden, daß die meisten chemischen Elemente, die im Gaszustand sicher nur ihr Molekül aus zwei Atomen zusammensetzen, durch die Bewegungen eines so einfachen Systems eine so verwickelte Fülle von verschieden großen Wellenlängen zu verursachen vermögen, wie es z. B. beim Eisen mit seinen mehreren tausend Linien der Fall ist.

Eine einschränkende Betrachtung in dieser Hinsicht haben wir bereits in unserem optischen Kapitel (S. 242) gemacht: Ein einziger Lichtton kann eine ganze Anzahl von „Obertönen" auslösen, deren Wellenlängen in einem einfachen Zahlenverhältnis zueinander stehen müssen, das sich auch in vielen Fällen als vorhanden erweist. Aber selbst bei den einfacheren Spektren, die allein erst daraufhin untersucht worden sind, bedarf man mehrerer solcher Serien zusammengehöriger Wellenlängen, um die Linien des Spektrums rechnerisch wiedergeben zu können. Nur der Wasserstoff, der einfachste chemische Körper, macht hiervon eine Ausnahme; seine Linien gehören nur einer einzigen Serie von Wellenlängen an, die wir schon auf S. 242 anführten. Wasserstoff löst also gewissermaßen nur einen Lichtakkord aus, dessen Wellenlängen sich durch die von Balmer aufgestellte Formel $\lambda = 364{,}72 \frac{m^2}{m^2-4}$ in Millionstel Millimetern ausdrücken lassen, wenn für m die Reihe der ganzen Zahlen von 3 ab gesetzt wird. Diese letztere Einschränkung rührt daher, daß die Formel für 1 eine negative Wellenlänge, für 2 einen unendlich großen Wert für sie ergeben würde. Für die anderen bisher untersuchten Stoffe wird die Formel $\frac{1}{\lambda} = A - \frac{B}{m^2} - \frac{C}{m^4}$ angewendet, in der A, B und C Konstanten sind, die für jeden Stoff besonders nach einer hier nicht näher zu behandelnden Methode bestimmt werden müssen. Es sind demnach, da m von 3 ab beliebig hoch genommen werden kann, in jeder Serie beliebig viele Linien vorhanden; außerdem hat jeder Stoff mehrere solcher Serien, von denen aber nur zwei bis jetzt berechnet worden sind. Mit Hilfe dieser Formel sind von Kayser und Runge eine Anzahl von Elementen der ersten drei Vertikalreihen des periodischen Systems auf S. 510 untersucht und folgende Zahlenreihen für die Konstanten festgestellt worden.

	Atomgewichte	Erste Nebenserie			Zweite Nebenserie			v	$\frac{v}{a^2}$
		A	B	C	A	B	C		
Li	7	28587	109625	1847	28667	122391	231700	—	—
Na	23	24475	110065	4148	24549	120726	197891	17	325
K	39	21991	114450	111146	22021	119363	62506	57	381
Rb	86	20939	121193	134616	—	—	—	234	322
Cs	133	19743	122869	305824	—	—	—	545	309
Cu	63	31592	131150	1085060	31592	124809	440582	249	622
Ag	108	30712	130621	1093823	30696	123788	394303	921	794
Mg	24	39796	130398	1432090	39837	125471	518781	41	713
Ca	40	33919	123547	961696	34041	120398	346067	102	638
Sr	88	31031	122328	837473	—	—	—	394	517
Zn	65	42945	131641	1236125	42955	126919	532850	386	918
Cd	112	40755	128635	1289619	40797	126146	555137	1159	929
Hg	200	40159	127484	1252695	40218	126361	613268	4633	1161
Al	27	48308	156662	2505331	48245	127527	687819	112	1534
In	114	44515	139308	1311032	44535	126766	643584	2213	1721
Tl	204	41542	132293	1265223	41506	122617	790683	7795	1879

Diese Zahlen geben, in die obige Formel eingesetzt und mit 10^8 dividiert, die Wellenlängen in üblichem Maß. Die diesen Nebenserien im Spektrum voranstehende Hauptserie, die in der Tabelle nicht angeführt ist, enthält die hauptsächlichsten Linien des betreffenden Stoffes; ihre Wellenlängen sind aus der obigen nur für die Nebenserien gültigen Formel nicht zu berechnen. Alle Linien, mit Ausnahme der des Wasserstoffes und Lithiums, erscheinen doppelt, zuweilen auch dreifach, und der Abstand der beiden gepaarten Linien voneinander hat überall die gleiche Schwingungsdifferenz bei demselben Spektrum, sowohl in der Haupt- wie in der Nebenserie. Diese Schwingungsdifferenz ist in der unter v geordneten Reihe unserer Tabelle angegeben. Sämtliche von jenen Molekularsystemen ausgehenden „Lichttöne" sind also gewissermaßen „Doppelschläge" mit sehr kleiner, aber für denselben Stoff immer gleichbleibender Schwingungsdifferenz. Noch merkwürdiger ist der Umstand, daß diese für jeden Stoff charakteristische Konstante auch bei verschiedenen, chemisch ähnlichen Stoffen nahe Übereinstimmung zeigt, wenn man sie durch das Quadrat ihres Atomgewichtes dividiert. Wir haben die so erhaltenen Zahlen in der letzten Reihe der Tabelle aufgeführt.

Es besteht also ein unzweifelhafter Zusammenhang zwischen der wichtigsten chemischen Konstante, dem Atomgewicht, und der allgemeinsten spektroskopischen Konstante, der Schwingungsdifferenz der Linienpaare. Die Linienpaare haben einen um so größeren Abstand, je größer das Atomgewicht des Stoffes ist, und zwar zeigt das Quadrat der Masse hier an, daß ein Einfluß des Trägheitsmoments dieser Masse auf die Geschwindigkeit der ausgehenden Lichtstrahlen stattgefunden hat.

Wir können uns eine Vorstellung von dieser Wirkung machen, wenn wir uns erinnern, daß die Moleküle der freien Elemente in den meisten Fällen aus zwei Atomen bestehen, durch deren verschiedene Schwingungen wir uns die Doppellinien hervorgebracht denken. Diese Doppelatome werden unter sonst gleichen Verhältnissen um so größere Schwingungsausschläge

ausführen, um so weitere Bahnen umeinander beschreiben, je größer ihre Masse ist. Auch hier zeigt sich wieder ein ganz wunderbarer Zusammenhang zwischen zwei scheinbar völlig unabhängigen Eigenschaften, dem Abstande der Spektrallinien und dem Atomgewicht. Man ist hiernach wenigstens theoretisch in den Stand gesetzt, bloß aus der spektroskopischen Untersuchung für eine in den unbekanntesten Fernen des Universums glühende, sonst unbekannte Substanz das Atomgewicht anzugeben, diesen Stoff also auf der chemischen Wage mit Wasserstoff zu vergleichen.

Freilich ist es zu diesem Zweck nötig, aus dem Spektralcharakter zu erkennen, welcher Gruppe von Stoffen der unbekannte Körper angehört. Aber auch dies ist möglich. Wir hätten die ausführliche Zahlentabelle nicht gebracht, wenn sie nicht auch in dieser Hinsicht lehrreich wäre; denn wir sehen, daß für die untereinander in einer Vertikalreihe des periodischen Systems stehenden, einander ähnlichen Elemente, die in gleicher Weise in der obigen Zusammenstellung untereinander aufgeführt sind, die Koeffizienten A, B und C in deutlich erkennbarer Beziehung zueinander stehen. Für alle in der Tabelle abgegrenzten Gruppen nehmen die Koeffizienten A mit steigendem Atomgewicht ab; die B sind einander für alle Elemente ähnlich, nehmen aber innerhalb der bezeichneten Gruppen meistens ab, und für die am wenigsten Einfluß auf die Wellenlänge übenden C scheint eine bestimmte Regel nicht vorhanden zu sein. Mit Hilfe der oben angeführten Formel $\frac{1}{\lambda} = A - B_{m^2} - C_{m^4}$ ist leicht zu zeigen, daß die Liniengruppen um so größere Wellenlängen annehmen, also sich um so mehr nach dem roten Ende des Spektrums verschieben, je größer bei sonst ähnlichen Elementen das Atomgewicht ist. Die Wellenlängen werden demnach größer mit der größeren Masse, die sie beeinflußt, was wieder mit den vorhergehenden Betrachtungen in Übereinstimmung ist. Hätten wir für das Spektrum eines unbekannten Stoffes die Koeffizienten berechnet, so könnten wir ihn unter Umständen in eine jener Gruppen einreihen und neben seinem Atomgewicht auch alle seine anderen chemischen Eigenschaften im Vergleich zu den benachbarten Elementen seiner Gruppe nur aus dem Spektralcharakter bestimmen.

Aus dieser Zusammenstellung der Linienserien ist nun noch folgendes zu entnehmen. Die beiden leichtesten Elemente (wenn man von dem noch nicht genügend untersuchten Helium einstweilen absieht), Wasserstoff und Lithium, haben keine Doppellinien. Entweder sind sie also in jenem Zustande hoher Glut, in welchem sie allein nur Emissionsspektren aussenden, wirklich einatomig, oder die Doppellinien sind zwar vorhanden, liegen aber einander so nahe, daß ihre Trennung praktisch nicht gelingt. Dies ist nach der gefundenen Regel, nach welcher die Linien im umgekehrten Verhältnis des Quadrates des Atomgewichtes zusammenrücken, durchaus wahrscheinlich. Wasserstoff allein hat nur eine Hauptserie von Linien, keine Nebenserien; beim Lithium braucht man schon zwei Nebenserien, die zueinander in keinem erkennbaren Verhältnis stehen, und bei den übrigen ist es wahrscheinlich, daß man mit den hier aufgeführten Serien nicht einmal auskommt. Die Übereinstimmung der berechneten mit den beobachteten Linien ist nicht immer befriedigend.

Das Auftreten mehrerer Serien ist sehr auffällig. Beständen nämlich die Molekularsysteme dieser Körper wirklich nur aus zwei Atomen, so ist nicht verständlich, wie von ihnen außer den Doppellinien noch verschiedene Lichtwellenserien ausgehen sollten; nur etwa „Obertöne", Linien der gleichen Serie, fänden eine Erklärung. Wir kommen wieder allein mit der Annahme aus, daß eben die Atome dieser Elemente noch weiter teilbar, diese also Verbindungen anderer Elemente sind. Allenfalls könnte man die Erklärung gelten lassen,

daß die Stoffe in jenem selbstleuchtenden Zustand, in welchem sie Emissionsspektren aussenden, ein kompliziertes Gemisch von Molekülen darstellen, das die verschiedenen Wellenlängen erzeugt. Bedenkt man aber, daß nach den verschiedensten, früher angeführten Erfahrungen bei solcher Hochglut eher eine Trennung als eine Zusammenfügung von Atomgruppen stattfinden wird, gegenüber dem normalen Zustand, in dem man das Molekulargewicht bestimmte, so erscheint es doch annehmbarer, wenn man die entsprechende Erklärung eine Stufe tiefer legt, indem man die bisher als Atome angesehenen Materievereinigungen zu Molekülen macht, deren Teile nur in diesen extremen Verhältnissen, vielleicht auf sehr kurze Zeit während des Selbstleuchtens, auseinandertreten, um sich sofort wieder zu verbinden, wenn ihre Temperatur sinkt. Da es sich um Nebenserien mit meist schwachen Linien handelt, so würde folgen, daß nur eine verhältnismäßig kleine Zahl jener sogenannten Elementenatome zeitweilig gespalten wird, die bei dem Glühprozeß zu besonders großen Temperaturschwingungen gezwungen worden sind. Deshalb gelingt uns auch niemals diese Spaltung mit unseren chemischen Reaktionsmitteln. Eine Prüfung der Hypothese wird einmal möglich sein, wenn erst für alle oder doch die meisten Elemente die zugehörigen Serien gefunden worden sind. Es würden dann, wenn in verschiedenen der gegenwärtig bekannten Elemente ein und dasselbe unbekannte Element enthalten ist, die zu ihnen gehörigen Nebenserien mit ihnen übereinstimmen müssen.

Selbst das Wasserstoffatom kann noch kein unspaltbarer Körper sein. Das oben angegebene einfache Gesetz, daß der Wasserstoff nur eine Linienserie aufweist, gilt nur für das sogenannte erste Wasserstoffspektrum, das entsteht, wenn man dieses Gas unter nicht zu hohem Druck in einer Geißlerschen Röhre dem elektrischen Funken aussetzt. Es gibt aber noch ein „zweites" Wasserstoffspektrum, das bei hohem Druck und hoher Temperatur auftritt und im Gegensatz zu dem so einfachen ersten Spektrum aus einer großen Zahl feiner Linien besteht, deren Lage keine Beziehung zu denen des bekannten Spektrums hat. Hier scheinen sich also die Uratome, welche wir von vornherein unseren Betrachtungen zu grunde gelegt hatten, mehr zu befreien. Unter noch extremeren Verhältnissen wird das Wasserstoffspektrum sogar kontinuierlich; die Atome schwirren alsdann ohne Regel in allen Wellenlängen durcheinander, finden sich aber sofort wieder zu den gewöhnlichen Atomen mit den bekannten Wellenlängen zusammen, sobald die Druck- und Temperaturverhältnisse dies gestatten.

Man kann auch das Spektrum eines Gases beobachten, wenn sich dieses unter gewöhnlichen Temperaturverhältnissen und nicht im selbstleuchtenden Zustand befindet. Wir haben zu dem Zweck nur eine Quelle kontinuierlichen Lichtes hinter ihm anzubringen, worauf das Gas, wie wir in unserem optischen Kapitel (S. 245) erfahren haben, diejenigen Lichtsorten auslöscht, welche es unter sonst gleichen Umständen ausgesandt haben würde. Es entsteht ein sogenanntes Absorptionsspektrum mit dunkeln Linien. Der molekulare Zustand eines Gases ist unter solchen Umständen immer genau bekannt. Wenn das Absorptionsspektrum mit dem Emissionsspektrum völlig übereinstimmt, wie es gewöhnlich angenommen wird, so ist damit auch entschieden, daß der molekulare Zustand in beiden Fällen der gleiche ist, und alle die Fragezeichen, welche wir vorhin in dieser Hinsicht machten, fallen fort. Leider aber können die Absorptionsspektren der Gase bei weitem nicht mit der gleichen Genauigkeit beobachtet werden wie ihre Emissionsspektren. Damit alle ihre feinen Linien, die sich von dem dunkeln Grunde noch scharf abheben, auch auf dem hellen kontinuierlichen Spektrum nun als dunkle Linien sichtbar werden sollten, müßten ganz enorme Mengen des betreffenden Gases durchleuchtet werden, denn

die Größe der Lichtabsorption hängt von jener Menge ab. Es erscheinen also in den Absorptionsspektren dieser Art immer nur die helleren Linien. Demnach läßt sich die Frage nicht entscheiden, ob die Nebenserien, welche uns über den veränderten molekularen Zustand allein etwas aussagen können, überhaupt unter diesen Umständen noch vorhanden sind. Auch kann man im Laboratorium nur von wenigen Elementen die Absorptionsspektren untersuchen, da die wenigsten in Dampfform zu bringen sind, oder, wenn dies unter Anwendung extremer Temperaturen gelingt, keine Lichtquelle mehr zu finden ist, die erheblich heißer wäre als diese Dämpfe, wodurch die „Umkehrung" des Spektrums hervorgerufen wird (S. 245).

Auf der Sonne freilich stehen die Dinge anders. Unter den dunkeln Linien des Sonnenspektrums sind viele, die solchen Nebenserien angehören, und es ist kein Zweifel, daß die Absorptionsspektren der auf der Sonne vorkommenden Elemente im wesentlichen mit ihren Emissionsspektren übereinstimmen, wie wir sie bei uns erzeugen. Aber dies beweist weder etwas dafür noch dawider, denn jene Stoffe befinden sich auf der Sonne auch in jenen Schichten, die das Licht bereits absorbieren, in einem heißeren Zustand, als wenn sie bei uns im Laboratorium zum Glühen gebracht werden, um ihr Emissionsspektrum zu beobachten. Dies bedeutet also nach unseren Voraussetzungen, daß die Atomspaltungen, die wir bei den selbstleuchtenden Stoffen im Laboratorium vorübergehend annehmen, auf der Sonne dauernd bestehen, daß, mit anderen Worten, dort uns unbekannte Elemente in Gasform vorhanden sind, deren Verbindungen wir nur als Elemente kennen, und die sich nur in extremen Temperaturverhältnissen auch unter unseren Händen teilweise und vorübergehend dissoziieren. Nur so können wir die Vielheit der Linienserien bei den übrigen Beziehungen des Spektralcharakters zum atomistischen Aufbau der Stoffe mechanisch erklären. Eine Bestätigung dieser Ansichten wird vielleicht einmal gefunden, wenn es gelingt, die Spektren der Elemente unter den verschiedensten Temperaturverhältnissen zu untersuchen.

Von den chemischen Verbindungen dagegen können wir meist die Absorptionsspektren genauer beobachten, wenn wir entsprechend konzentrierte Lösungen der betreffenden Stoffe durchleuchten. Da in den Flüssigkeiten die Moleküle untereinander zu größeren Systemen zusammentreten, ist es ohne weiteres verständlich, daß das Spektrum dieser in Lösung befindlichen Stoffe ein wesentlich anderes sein wird als das ihrer Grundstoffe. Die Lösungen zeigen ein Bandenspektrum mit an- und abschwellender Absorption. Diese Banden werden in Wirklichkeit aus sehr vielen Linien bestehen, die nur, weil sie zu nahe beieinander liegen, nicht mehr einzeln gesehen werden können. Der Bandencharakter aber beweist bereits ihr Auftreten in Serien, wie wir es auch bei den Elementen wahrnahmen. Die Untersuchung der Bandenspektren bietet der exakten Messung natürlich bedeutende Schwierigkeiten, weil eben selten scharfe Abgrenzungen in ihnen hervortreten. Dennoch hat man eine Anzahl von Regelmäßigkeiten an ihnen entdeckt, die wieder in völliger Übereinstimmung mit unseren spektralanalytischen Erfahrungen stehen. Es zeigt sich z. B., daß die Banden sich meist um so mehr nach dem roten Ende des Spektrums hin verschieben, je mehr gleiche Gruppen von Atomen wir einer Verbindung hinzufügen, wie es in den verschiedenen Reihen von Kohlenstoffverbindungen zu geschehen pflegt. Je schwerer also das Molekül wird, desto größere Lichtwellen erzeugt, beziehungsweise verschluckt es. Man nennt derartige Atomgruppen bathochrome im Gegensatz zu den hypsochromen, die eine Verschiebung der Banden nach Violett bewirken, aber im Verhältnis zu den anderen sehr selten sind. Die Gruppen, welche uns unter den Namen Hydroxyl, Methyl, Karboxyl, Phenyl bekannt sind, und die

Einführung der vier Halogene Fluor, Chlor, Brom und Jod wirken bathochrom, die Nitro- und Amidogruppe sowie einzelne angehängte Wasserstoffatome wirken dagegen hypsochrom. Beide Richtungen von Verschiebungen gehen im allgemeinen proportional mit der Vergrößerung der Molekulargewichte bei der Hinzufügung jener Gruppen. Also immer wieder zeigt sich zweifellos ein Einfluß der Masse jener molekularen Weltsysteme auf die Bewegungen der umgebenden Materie, im vorliegenden Falle auf die des Lichtäthers.

Die Farbe jeder Substanz, in welchem Aggregatzustande sie sich auch befinden möge, ist bei auffallendem oder durchfallendem Licht immer eine Folge ihrer Lichtabsorption, also ihres Spektrums. Dieselben Regelmäßigkeiten, welche wir an dem letzteren wahrnahmen, müssen sich auch in den natürlichen Farben der Stoffe wiederfinden. Jeder Farbstoff muß im auffallenden Licht ein Gemisch derjenigen Farben zeigen, welche zu denen komplementär sind, die er im durchscheinenden Licht im Spektrum auslöscht. Die hier einander gegenüberstehenden Farben sind komplementär:

Violett	Grüngelb
Indigo	Gelb
Cyanblau	Orange
Blaugrün	Rot
Grün	Purpur.

Es wurde soeben nachgewiesen, daß die Einführung einer „bathochromen" Atomgruppe die Absorptionsbanden nach Rot verschiebt. Stellen wir uns einmal vor, ein Stoff besäße nur eine Bande, die sich zunächst im Ultraviolett befindet. Da dann keine sichtbare Farbe ausgelöscht wird, muß der Körper weiß erscheinen. Führen wir nun z. B. eine Methylgruppe in die Substanz ein, so möge die Bande dadurch in das sichtbare Violett rücken. Da die Komplementärfarbe zu Violett Gelbgrün ist, so wird der Stoff also diese Farbe annehmen. Nun hängen wir an den Kern der betreffenden Verbindung immer weitere Methylgruppen und sehen die Absorptionsbande gegen Blau hinrücken; seine Farbe geht gleichzeitig mehr und mehr in Rot über und wird purpurn, wenn die Bande sich im Grün befindet. Bei weiterem Vorrücken wird der Stoff violett, blau und schließlich grün, wenn die Bande im äußersten sichtbaren Rot angekommen ist. Farbenänderungen in diesem Sinne werden tatsächlich beobachtet, wenn man einer Verbindung mehr und mehr die betreffenden gleichen Atomgruppen hinzufügt, und es folgt zugleich, daß die chemisch einfachsten Stoffe meist weiß oder gelblich, die am meisten zusammengesetzten grün sein werden. Die Fülle der verschiedenen Anilinfarben, welche alle derselben Reihe von Verbindungen in dem erörterten Sinn angehören, verdanken diesem Prinzip ihre Entstehung. Hiernach ist auch die Leichtigkeit verständlich, mit welcher die lebendige Natur mit denselben Stoffen ihren entzückenden Reichtum an Farben hervorbringt. Die grüne Farbe der Blätter zeigt an, daß die in ihnen enthaltene organische Substanz, welche Zusammensetzung sie auch haben mag, Absorptionsstrahlen im Rot besitzt. Wir brauchen also nur anzunehmen, daß in einem gewissen Teile des Pflanzenkörpers ein Auflösungsprozeß beginnt, durch den ein Teil der in jeder organisierten Substanz enthaltenen bathochromen Atomgruppen in Freiheit gesetzt oder verbraucht wird, so muß der betreffende Pflanzenteil, sagen wir die Blütenblätter, eine blaugrüne bis blaue Farbe annehmen. Bei dem beginnenden Verwesungsprozeß der organisierten Substanzen werden häufig Stickstoffverbindungen frei, die „hypsochrom" wirken. Deshalb werden mit weiterem Fortschreiten dieses Zerfalles die grünen Blätter gelb oder selbst rot.

Es ist hier für unsere Überzeugung von der Zusammensetzung der sogenannten chemischen Elemente von großem Interesse, zu sehen, daß sich auch in Hinsicht auf ihre Farbe die vier Halogene wieder wie entsprechende Verbindungen verhalten, denen je nach dem steigenden Atomgewicht eine bathochrome Atomgruppe hinzugefügt ist. Fluor, das leichteste Halogen, ist farblos, Chlor, das nächstschwerere, ist grüngelb, ihm folgt das Brom mit rötlichen Dämpfen und endlich das Jod mit seiner schön violetten Farbe in der Dampfform. Auch andere, chemisch ähnliche Elemente zeigen solche Farbenabstufungen nach ihren Atomgewichten, während im allgemeinen kein solcher Zusammenhang bei chemisch verschiedenartigen Elementen zu bemerken ist.

Selbst in den äußerlich sichtbaren Farben der Stoffe und ihren Veränderungen durch Verwesung und Verwitterung erkennen wir Beziehungen, die auf einfache mechanische Gesetzmäßigkeiten hindeuten, wenn auch ihr mathematischer Ausdruck noch nicht gefunden worden ist.

Wenn wir hier entdeckten, daß durch gewisse Atomgruppen eine Verschiebung der Absorptionsbanden bewirkt wird, so scheinen andere Gruppen diese Banden überhaupt hervorzurufen und dadurch es eigentlich erst möglich zu machen, solche Farbenabstufungen herzustellen. Man nennt diese Gruppen nach dem Vorgange von O. N. Witt „Chromophore". Die Azogruppe N_2H_2 gehört in erster Linie hierher. Diese Chromophore wären also die eigentlichen lichtabsorbierenden Atomgruppen, die die Energie der Wellenbewegung des Äthers um so mehr beeinflussen, je schwerer der ganze Atomkomplex ist, dem sie angehören.

Auch die Fluoreszenzerscheinungen scheinen an bestimmte Atomgruppen gebunden zu sein (Liebermann und Rich. Meyer), die meist recht komplizierter Art sind und in der Strukturformel als Ringe mit daranhängenden Reihen dargestellt werden können. In diesen vielgliederigen Molekularsystemen wird also ein Teil der Energie des absorbierten Lichtes nicht in Wärme, wie in den vorhin betrachteten Fällen, sondern wieder in eine andere Art von Lichtschwingung zurückverwandelt. Es gibt Fluorophore, wie wir Chromophore kennen lernten. Aber über den engeren Zusammenhang der eigentlichen Fluoreszenzerscheinungen mit dem molekularen Bau, über den Grund, weshalb gerade jene Gruppen durch Lichtabsorption selbstleuchtend werden, ist noch gar nichts bekannt.

Das in einem Körper nicht absorbierte Licht wird aber nicht ganz frei durchgelassen, sondern mehr oder weniger gebrochen, beziehungsweise doppelt gebrochen, polarisiert oder gedreht. In unserem optischen Kapitel haben wir uns mit diesen Eigenschaften bereits eingehender beschäftigt; es ist deshalb hier nur noch nötig, auf den Zusammenhang dieser Eigenschaften mit dem molekularen Bau kurz zurückzukommen, bez. unsere bezüglichen Erfahrungen zu ergänzen.

Schon auf S. 223 haben wir die sogenannte Molekularrefraktion kennen gelernt, die sich im Gegensatze zu dem gewöhnlichen Brechungskoeffizienten unabhängig von der Temperatur und selbst vom Aggregatzustand des betreffenden Stoffes erweist. Ihre Größe kann deshalb nur noch mit dem molekularen Zustand in Beziehung stehen. Dies zeigt sich nun auf folgende Weise: bestimmen wir durch die Beobachtung die Atomrefraktionen der Elemente, so kann man aus diesen die Molekularrefraktionen ihrer Verbindungen durch einfache Addition mit Berücksichtigung der Art der Bindung, die hier einen Einfluß zeigt, finden. Ein Beispiel möge dies erläutern. Die Atomrefraktion des Kohlenstoffs wurde (für die rote H-Linie) gleich 2,365, die des Wasserstoffes 1,103 gefunden. Außerdem wurde ermittelt, daß für jedes bereits mit einem Wasserstoffatom gesättigte Kohlenstoffatom, das, wie in den Ringverbindungen, doppelt

gebunden ist, die Refraktion noch um 1,836 zunimmt. Wir erhalten dann für das Benzol C_6H_6 die Molekularrefraktion wie folgt:

6 Kohlenstoffatome . . .	6 × 2,365 = 14,190
6 Wasserstoffatome . . .	6 × 1,103 = 6,618
3 Doppelbindungen . . .	3 × 1,836 = 5,508
Molekularrefraktion von C_6H_6	= 26,32

Aus dem beobachteten Brechungskoeffizienten des Benzols folgt seine Molekularrefraktion zu 25,93 in genügender Übereinstimmung mit dem theoretisch gefundenen Wert. Auf dieselbe Weise lassen sich aus der Strukturformel recht komplizierter Verbindungen ihre Brechungsverhältnisse ziemlich genau vorhersagen.

Anderseits ergeben sich sichere Beziehungen dieser Molekularrefraktion zum Molekularvolumen, das uns bereits bei Besprechung der Regelmäßigkeiten des Schmelzpunktes der Elemente auf S. 539 interessiert hat. Die Ablenkung des Lichtes in einem durchstrahlten Körper, gleichviel in welchem Aggregatzustand er sich befindet, zeigt sich abhängig von dem Raume, den seine Atome einnehmen, mit Berücksichtigung der besonderen Bindungsarten, die ja auch bei sonst gleicher Atomart und -Zahl zu verschiedener Raumausfüllung führen müssen. Es ist für die weitere Bestätigung unserer Anschauung von der gegenseitigen Beeinflussung der Ätherbewegungen und der der größeren Materieansammlungen in den chemischen Molekülen sehr wichtig, zu sehen, daß dieser Einfluß nicht vom Atomgewicht abhängt, sondern von der Raumausfüllung der Atome und Moleküle. Es folgt hieraus, daß zwischen den Ätheratomen und den chemischen Atomen in diesem Falle keine Kraft wirksam ist, die mit der Gravitation zu vergleichen wäre, und die notwendig vom Atomgewicht abhängen müßte; die Ätheratome finden vielmehr an den chemischen Atomen nur Hindernisse in ihrer Fortbewegung, prallen sogar von ihnen ab. Deshalb wird die Strahlenbrechung zunächst von der Dichte des Stoffes (also mittelbar auch von der Temperatur und dem Aggregatzustand), d. h. von dem Abstand der Moleküle unter sich, und dann von deren eigener Raumausfüllung beeinflußt. Wir können dies merkwürdige Gesetz noch einfacher ausdrücken und sagen: die Lichtbrechung steht im direkten Verhältnis des von den Körpern der Moleküle selbst ausgefüllten Raumes zu dem Raume, welcher zwischen den Molekülen liegt.

Die Gesetzmäßigkeiten der Molekularrefraktion stellen sich dadurch in einen bedeutsamen Gegensatz zu denen der Lichtabsorption, die deutliche Beziehungen zum Molekulargewicht gezeigt hatte. Das absorbierte Licht setzt sich in Wärme um, und diese ist eine Bewegung der Massenatome. Für die Summe der Ablenkungen aber, welche die Ätheratome durch die Moleküle erfahren, kann nur ihr Querschnitt maßgebend sein.

Einfach lichtbrechend wirkt bekanntlich jede für Licht überhaupt durchlässige Substanz. Bei einigen, die sich ohne weiteres von den anderen nicht unterscheiden, treten noch die besonderen Erscheinungen der Drehung der Polarisationsebene, der Doppelbrechung u. s. w. auf. Aber auch hier steht wieder überall der molekulare Bau im unzweifelhaften Zusammenhang mit diesen besonderen optischen Erscheinungen. Eine Drehung der Polarisationsebene sehen wir auf zweierlei Weise entstehen, je nachdem sie in Flüssigkeiten, Gasen oder in Kristallen beobachtet wird. Diese Drehung zeigen organische Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen im flüssigen Zustand, namentlich solche mit dem mehrerwähnten asymmetrischen Kohlenstoffatom, über dessen mechanische Wirkung wir schon auf S. 517 Vermutungen ausgesprochen haben. Wenn man in einzelnen Fällen bei solchen Verbindungen mit asymmetrischem

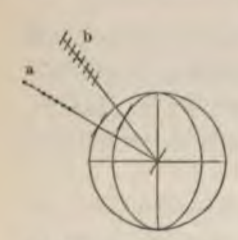
Kohlenstoffatom keine Drehung beobachtet, so liegt dies entweder daran, daß die Größe der Drehung unter unserer Beobachtungsfähigkeit liegt, oder daß, wie bei dem mehrfach erwähnten Beispiele der Weinsäure, zwei verschiedene Atomgruppen mit entgegengesetzter Drehung vorhanden sind, die ihre Wirkung scheinbar aufheben, aber zuweilen voneinander getrennt werden. Wir haben also diese Drehung den asymmetrischen Kohlenstoffverbindungen ganz allgemein zuzuschreiben; sie liegt in der Gruppierung der Atome im Molekül begründet.



Wellenflächen eines optisch einachsigen Kristalles. Vgl. Text, S. 565.

Anders verhält es sich dagegen bei den Kristallen. Bei ihnen zeigen sich die optischen Eigenschaften nicht mehr vom Bau der Moleküle selbst abhängig, sondern von ihrer Anordnung untereinander, die den Kristallcharakter bedingt. Wir gelangen immer beim festen Zustand in eine Stufe gröberer Gruppierungen der Materie.

Man hat die Kristalle in Bezug auf ihre optischen Eigenschaften in verschiedene Gruppen nach folgenden Gesichtspunkten geteilt: die geordneten Schichtungen der Moleküle, die die Kristallform ergeben, bedingen eine verschiedene Durchlässigkeit für das Licht je nach der Richtung, in welcher es den Kristall durchdringt, und diese bevorzugten Richtungen fallen mit den Kristallachsen zusammen. Wegen dieser verschiedenen Durchlässigkeit ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im Kristall in der Richtung seiner verschiedenen Achsen auch eine verschiedene. Würden wir in den Schnittpunkt dieser Achsen, also in den Mittelpunkt des Kristalles, eine Lichtquelle bringen, so müßte sich eine von dieser ausgehende Lichtschwingung nach allen Seiten gleichmäßig ausbreiten, wenn alle Richtungen ihr den gleichen Widerstand entgegenstellen, und nach einer bestimmten Zeitspanne müßten deshalb die Punkte, zu denen die Schwingung gleichzeitig rings um die Lichtquelle herum gelangt ist, eine Kugelfläche bilden, deren Punkte alle gleichweit vom Mittelpunkte entfernt sind. Diese so bestimmte Wellenfläche wird aber nicht mehr kugelförmig sein, wenn eine oder mehrere Richtungen in dem Kristall in Bezug auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bevorzugt sind. Die Wellenflächen werden also je nach der Art des Kristallbaues verschiedene Formen zeigen, und nach diesen ist die Einteilung der Kristalle nach ihren optischen Eigenschaften geschehen.



Ordentlicher (a) und außerordentlicher (b) Strahl in einem positiv einachsigen Kristall. Vgl. Text, S. 565.

Bei den regulären Kristallen, deren drei gleichlange Achsen aufeinander senkrecht stehen, die also nach allen ihren Richtungen gleiche Eigenschaften haben, weshalb man sie als isotrope Kristalle bezeichnet, muß die Wellenfläche eine Kugel sein, wie in irgend einer homogenen amorphen Masse. Diese Kristalle können deshalb auch optisch keine besonderen Eigenschaften vor den einfachen homogenen Körpern voraus haben. Sie brechen das Licht einfach und drehen es nicht. Eine Ausnahme machen gewisse Kristallformen, die aus der Ineinanderschachtelung zweier regulären Kristalle von verschieden großen Achsen entstanden sind, wie der Pentagondodekaeder, die dann zwei konzentrisch ineinander steckende kugelförmige Wellenflächen haben, deren Widerstreit eine Drehung der Polarisationsebene hervorrufen kann.

Alle anderen Kristallsysteme sind anisotrop, d. h. ihre Eigenschaften sind verschieden in verschiedenen Richtungen. Beim hexagonalen und tetragonalen System bleibt jedoch eine

Richtung, bei der die Symmetrieverhältnisse dieselben sind wie beim regulären System. Man nennt dieses System **optisch einachsig**. In dieser einen Richtung ist der Querschnitt der Wellenfläche gleichfalls ein Kreis wie bei den regulären Kristallen. In allen anderen Richtungen aber stellt er sich als eine **Ellipse** dar (s. die obere Abbildung, S. 564). In diesen anderen Richtungen muß sich, was alles streng mathematisch festzustellen ist, ein von der Mitte des Kristalles ausgehender Lichtstrahl in zwei Richtungen spalten, wie es die untere Zeichnung auf S. 564 veranschaulicht. Der eine dieser Strahlen erfährt keine anderen Veränderungen als die der regulären Brechung, der andere aber ist polarisiert. Wir haben hier den ordentlichen und den außerordentlichen Strahl vor uns, den wir auf S. 282 kennen lernten, als wir uns mit der Doppelbrechung beschäftigten. Alle optisch einachsigen Kristalle sind infolgedessen doppeltbrechend und polarisierend, denn der außerordentliche Strahl ist ja stets polarisiert. Es sind nun hier noch verschiedene Fälle zu unterscheiden. Die Kreiswelle kann die elliptische Welle einschließen und in ihren Polen berühren (s. die untere Abbildung, S. 564); einen solchen Kristall nennt man **positiv einachsig**. Wenn dagegen die Ellipse den Kreis umschließt, so ist der Kristall **negativ einachsig**, und die Lage der beiden Strahlen ist, wie es die obenstehende Zeichnung andeutet, verschieden. Endlich können Kreis und Ellipse sich schneiden, was wieder bei den ineinander geschachtelten Kristallformen der Fall ist. Dann tritt zu der Doppelbrechung noch eine Drehung der Polarisationsebene des außerordentlichen Strahles.



Querschnitt der Wellenflächen negativ einachsiger Kristalle.

Bei den drei anderen Kristallsystemen, dem **rhombischen**, **monoklinen** und **triklinen**, die sich durch drei verschiedene, bei den beiden letzten auch noch gegeneinander geneigte Achsen von den ersten Systemen unterscheiden, wird auch die Wellenfläche entsprechend verwickelter und setzt sich aus zwei oder mehr Ellipsoiden zusammen (s. die folgende Abbildung). Kein durch solche Kristalle gehender Strahl folgt den gewöhnlichen Brechungsgesetzen; es sind alles außerordentliche Strahlen. Diese Kristalle sind nach jeder Richtung hin doppeltbrechend, polarisierend und meist auch drehend. Infolge des Widerspiels der verschiedenen Wellenflächen fallen auch die optischen Achsen mit den kristallographischen nicht mehr zusammen, wie es bei den symmetrischen Formen der Fall ist.



Wellenflächen des rhombischen, monoklinen und triklinen Systems.

Fassen wir die erlangten Resultate zusammen, so sehen wir, daß die in ihrer Kristallform einfacheren Körper, die nach unserer Zusammenstellung auf S. 547 auch die chemisch einfacheren sind, sich gleichzeitig durch optisch einfachere Eigenschaften auszeichnen, daß also auch hier der molekulare Bau in letzter Linie entscheidend ist. Es gibt keine physikalische Eigenschaft der Materie, die nicht von ihrer molekularen Zusammensetzung abhinge. Auf S. 302 haben wir erfahren, daß der **Magnetismus** ein optisches Drehungsvermögen in Substanzen hervorzurufen vermag, die diese Eigenschaft unter gewöhnlichen Umständen nicht haben. Da wir annehmen müssen, daß diese magnetischen Einflüsse nur die Lage der Moleküle zueinander, nicht etwa die Lage der Atome in den Molekülen verändern, weil doch keine chemischen Einwirkungen durch den Magnetismus beobachtet werden, so müssen wir auch rückschließen, daß das bei gewissen, oben angeführten Kristallklassen auch unter gewöhnlichen Umständen

vorhandene Drehungsvermögen nicht dem inneren Bau der Moleküle, sondern deren gegenseitiger Lage zuzuschreiben ist, wie wir schon anfangs im Gegensatze zu den drehenden Flüssigkeiten andeuteten.

b) Einfluß des Lichtes auf den chemischen Zustand.

Da alle Körper Licht absorbieren, so muß ein Teil der Energie der Lichtwellen zu Veränderungen in den molekularen Systemen verwendet werden, und wir haben wiederholt erfahren, daß diese den Ätherbewegungen genommene Kraft meist zur Vergrößerung der Wärmeschwingungen, also zur Erhöhung der Temperatur der absorbierenden Körper dient. Es ist aber zunächst kein Grund vorhanden, weshalb nicht auch chemische Veränderungen dadurch hervorgerufen werden sollten. Denn da die Bahnen der Moleküle durch die Lichtwirkung verändert werden, können sich auch die Bahnen der Atome im Molekül dabei so weit verschieben, daß sie sich zu neuen Systemen gruppieren, wie sie es infolge von Wärmewirkungen unter entsprechenden Umständen tun. Man sollte sogar meinen, daß solche Bewegungen von Atomen leichter vor sich gehen müßten als die der schwereren Moleküle. Es ist ja auch, seit die Photographie zu einem Sport geworden ist, allbekannt, daß das Licht chemische Veränderungen hervorbringt, aber es scheint doch auf den ersten Blick, als ob solche Wirkungen sich nur auf sehr vereinzelte Verbindungen erstrecken.

Ein ganz allgemeiner Grund hierfür ist sofort zu finden. Die Natur sucht und findet überall den Ausgleich, denn Wirkung und Gegenwirkung bringen unter allen Umständen einen Gleichgewichtszustand hervor, und ein und dieselbe Wirkungsart, die gleiche Zustände beeinflußt, muß sich schließlich neutralisieren. Da nun alle Stoffe, die wir auf der Erde kennen, auch wenn sie aus ihren Tiefen genommen werden, schon einmal von demselben Sonnenlicht beschienen worden sind, so hat sich alle photochemische Wirkung längst neutralisiert. Es können lichtempfindliche Substanzen nirgendwo anders als in den dunkeln Tiefen der Erde, in denen chemische Veränderungen überhaupt selten auftreten, oder über Nacht entstehen; wenn sie aber sehr empfindlich sind, werden sie längst wieder umgebildet sein, ehe wir sie zu entdecken vermögen. Nur weniger lichtempfindliche Verbindungen, die also nur langsam wieder vom Lichte zersetzt werden, sind uns zugänglich. So sehen wir, daß gewisse Farbstoffe vom Licht allmählich ausgebleicht werden; sie sind also lichtempfindlich, wenn auch unter normalen Umständen nur in sehr geringem Grade.

Die Möglichkeit der Existenz außerordentlich lichtempfindlicher Verbindungen, gegen die selbst alle uns bekannten derartigen Stoffe weit in den Hintergrund treten, ist aber keineswegs ausgeschlossen, nur sind unsere Untersuchungsmethoden unzulänglich, solche Verbindungen jemals aufzufinden (vgl. S. 44).

In der toten Natur ist ihr vorübergehendes Auftreten höchst unwahrscheinlich, denn die verhältnismäßig geringen Temperatur- oder allgemein Energieschwankungen auf der Erdoberfläche lassen, soweit es sich um anorganische Verbindungen handelt, nur geringe Schwankungen des chemischen Zustandes zu. Es ist darum nicht anzunehmen, daß über Nacht neue, uns unbekannte Verbindungen dieser Art entstehen.

Anders ist es in der organischen Natur, in deren Bereich beständig in jeder Zelle eines lebenden Wesens eine vielseitige chemische Arbeit geleistet wird, und alle von uns kaum ausdenkbaren Verbindungen zwischen den Organogenen hergestellt und wieder gelöst werden. Hier ist es sehr wahrscheinlich, daß in der Nacht unter anderen auch solche Verbindungen gebildet

werden, die das Tageslicht nicht vertragen, möglicherweise sind einige von ihnen so zart, daß wir sie niemals entdecken werden. Doch eine kennen wir, wenn auch nur mittelbar, sehr genau; es ist die, welche, am Lichte zersetzt, das Blattgrün, das Chlorophyll, erzeugt. Dieses wieder ist allein unter dem Einfluß des Lichtes im stande, aus der von den Tieren ausgeatmeten Kohlensäure den Sauerstoff frei zu machen und ihn uns zu den für unsere Lebenserhaltung nötigen Oxydationsprozessen zur Verfügung zu stellen. Jener photochemische Prozeß ist es also ganz allein, der uns das Leben erhält und dadurch zur wichtigsten Wirkung im ganzen Kreislauf des Lebens wird. Da aber dieser Prozeß wieder nach den bisherigen Erfahrungen nicht möglich ist, wenn nicht durch den Wechsel von Tag und Nacht ein beständiger Austausch von photochemischer Energie eintritt, so werden die gesamten Lebensregungen auf unserem Planeten abhängig von der astronomischen Konstante der Erdachsendrehung. Auf einem Weltkörper ohne Achsendrehung wäre ein Lebensprozeß in der uns bekannten Form auf die Dauer ganz unmöglich, mag auch ein solcher Körper sonst in seinen Licht- und Wärmeverhältnissen dem unsrigen vergleichbar sein. Kehrt also wirklich unsere Nachbarwelt diesseit der Sonne, die Venus, dem Zentralgestirn beständig dieselbe Seite zu, wie es von Schiaparelli behauptet, von anderer Seite aber bestritten wird, so ist dieses schöne Gestirn jedenfalls auf dem größten Teile seiner Oberfläche ausgestorben. Man darf dieser Schlußfolge nicht entgegenhalten, daß auf der Erde innerhalb des Polarkreises bei monatelangem Tage doch ein üppiger Wiesenwuchs sich entfaltet. Auch hier würde bei gänzlich ununterbrochener Bestrahlung jene heilsame und unerläßliche Wechselwirkung bald aufhören.

Die Zusammensetzung des Chlorophylls, des Trägers jener photochemischen Lebenserscheinungen, ist ebenso wie die des kaum minder wichtigen Eiweißes noch nicht genau zu ermitteln gewesen. Jedenfalls ist es eine sehr verwickelte Verbindung, die neben den Organogenen auch noch mineralische Elemente, namentlich in geringen Mengen Eisen enthält. Man hat das Chlorophyll niemals rein von den übrigen vegetabilischen Produkten, mit denen es auftritt, abtrennen können, weil es ein sehr leicht zersetzlicher Stoff ist, der unter den Händen der Chemiker sozusagen verschwindet. Dabei ist das Chlorophyll nicht einmal der eigentliche lichtempfindliche Stoff, sondern das Produkt eines anderen Stoffes, das durch dessen Belichtung entsteht. So erzeugen die im Dunkeln wachsenden Pflanzen einen gelben Farbstoff, das Etiolin, das am Lichte grün wird und sich in Chlorophyll verwandelt. Aber das Chlorophyll zeigt sich noch in ganz eigentümlicher Weise lichtempfindlich, indem das Licht eine richtende Kraft auf dasselbe übt. Bei nicht zu starker Beleuchtung legen sich die Chlorophyllkörner an diejenigen Seiten der Zellwände, welche vom Lichte getroffen werden, und bieten dem Lichte die breiteste Oberfläche dar. Sie bilden auf diese Weise, z. B. auf den Oberflächen der Blätter, einen grünen Schirm, der nur ganz bestimmten Strahlengattungen den Zutritt in die tiefer liegenden Schichten des organischen Gewebes gestattet. Bei starker Bestrahlung dagegen fliehen sie das Licht, soweit es geht: sie legen sich parallel zu den Strahlen an diejenigen Zellwände, welche am wenigsten vom Lichte getroffen werden. Dieses allzu helle Licht zersetzt nunmehr dasselbe Chlorophyll, welches es bei schwächerer Strahlung gebildet hatte. Unter dem Einfluß des Lichtes geht ein ununterbrochener Bildungs- und Zersetzungsprozeß vor sich, dem in irgend einer noch nicht aufgeklärten Weise die Pflanzen ihr Wachstum und mittelbar die Tiere ihre Nahrung verdanken. Die Vorgänge sind noch wenig bekannt, und es ist wohl möglich, daß das Chlorophyll bei dem eigentlichen Assimilierungsprozeß nur eine untergeordnete Rolle spielt. Allerdings bilden sich die Stärkekörner, die die Grundsteine zu allem Wachstum

Bestrahlung das Chlorophyll mehr und mehr verschwindet, [illegible] auszuatmen; sie verbraucht ihn sogar ebenso wie die Tiere, [illegible] Wir sehen auch hier wieder, an wie fein abgewogene Bedingungen [illegible] ist. Sowohl Dunkelheit wie allzu helles Licht oder der Mangel an [illegible] würde das Leben bei uns zerstören.

Außerdem ist die **Chlorophyllbildung** noch an das [illegible] **stimmten Wärmemenge gebunden**. Wenn diese im Frühjahr [illegible] die junge Belaubung einen deutlichen „Stich" ins Gelbliche, [illegible] wird, sehen wir die prächtigen Färbungen der Blätter eintreten, [illegible] stimmten Pflanzen allerdings der Bildung eines besonderen [illegible] schon auftritt, wenn auch das Chlorophyll noch nicht zersetzt ist. [illegible] die den ganzen Sommer hindurch rote Blätter tragen, wie die [illegible] grünen Gewächsen, die, wie unsere Koniferen, den Winter überdauern, [illegible] in eigentümlicher Weise umgewandelt, so daß es wohl bestehen bleibt, [illegible] die Atmung nicht mehr unterhält, bis die dazu nötige Temperatur [illegible] diese immergrünen Gewächse machen also einen Winterschlaf durch, [illegible] den, nur ist er kürzer, weil das Chlorophyll ja vorhanden bleibt [illegible] ginnt, sobald es die Temperatur gestattet.

Ein noch fast ganz unbekannter und doch eine höchst wichtige [illegible] ferner der **Sehpurpur im Auge des Menschen**, von dessen [illegible] wiederholt gesprochen haben, z. B. S. 42.

Eigentümlich ist die photochemische Eigenschaft, die unter [illegible] auch diejenige Modifikation des Eiweiß zeigt, die wir als **Leim** [illegible] scheinlich, daß sie gleichfalls beim Aufbau des Pflanzenkörpers [illegible] bei dem sogenannten **Pigmentverfahren** in der modernen [illegible] licher Leim löst sich nicht in kaltem, wohl aber in erwärmtem [illegible] Eigenschaft verliert er, wenn man ihm **Kaliumbichromat** [illegible] aussetzt; er ist dann auch in kochendem Wasser unlöslich [illegible] lichteten Stellen einer entsprechend präparierten Gelatinehaut [illegible] Eigenschaft erhält man farbige Abdrücke von photographischen [illegible]



Herbstliche Laubfärbung in Nordamerika (Indian summer).

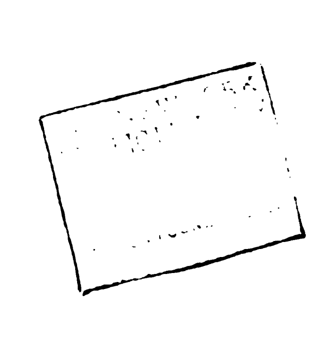
sind, nur in Gegenwart des Chlorophylls. Auch nehmen im Dunkeln wachsende, [illegible] grüne Pflanzen keine mineralischen Bestandteile auf; sie schwellen nur durch Wasser[illegible] können aber nicht blühen oder Früchte tragen und vermehren den für die lebende [illegible] nenen Stoff um nichts. Nach den Untersuchungen von **Pringsheim** scheint es, [illegible] Chlorophyll nur als eine Schutzdecke, als ein farbiger Schirm dient, der eine Auslese [illegible] Wellenlängen des Lichtes zu treffen hat, denen im Inneren der Zellen jener [illegible] Prozeß der Spaltung der Kohlensäure in Kohlenstoff für den weiteren Aufbau des [illegible] körpers und in Sauerstoff für die Atmung der Tiere allein nur gelingt. Wenn [illegible] Bestrahlung das Chlorophyll mehr und mehr verschwindet, hört die Pflanze auf, [illegible] auszuatmen; sie verbraucht ihn sogar ebenso wie die Tiere, indem sie Oxydationsprodukte [illegible] Wir sehen auch hier wieder, an wie fein abgewogene Bedingungen der Lebensprozeß [illegible] ist. Sowohl Dunkelheit wie allzu helles Licht oder der Mangel an Abwechselung zwischen [illegible] würde das Leben bei uns zerstören.

Außerdem ist die **Chlorophyllbildung noch an das Vorhandensein** [illegible] **stimmten Wärmemenge gebunden.** Wenn diese im Frühjahr noch nicht erreicht [illegible] die junge Belaubung einen deutlichen „Stich" ins Gelbliche, und wenn es im Herbst [illegible] wird, sehen wir die prächtigen Färbungen der Blätter eintreten, deren rötlicher Ton [illegible] stimmten Pflanzen allerdings der Bildung eines besonderen Farbstoffes zu danken [illegible] schon auftritt, wenn auch das Chlorophyll noch nicht zersetzt ist. Daher gibt es auch [illegible] die den ganzen Sommer hindurch rote Blätter tragen, wie die Rotbuchen u. s. w. In den [illegible] grünen Gewächsen, die, wie unsere Koniferen, den Winter überdauern, wird das Chlorophyll [illegible] in eigentümlicher Weise umgewandelt, so daß es wohl bestehen bleibt, aber das Wachstum [illegible] die Atmung nicht mehr unterhält, bis die dazu nötige Temperatur wieder eingetreten ist. [illegible] diese immergrünen Gewächse machen also einen Winterschlaf durch, wie die ihr Laub [illegible] den, nur ist er kürzer, weil das Chlorophyll ja vorhanden bleibt und seine Tätigkeit [illegible] ginnt, sobald es die Temperatur gestattet.

Ein noch fast ganz unbekannter und doch eine höchst wichtige Rolle spielender [illegible] ferner der **Sehpurpur im Auge des Menschen**, von dessen vermutlicher Aufgabe [illegible] wiederholt gesprochen haben, z. B. S. 42.

Eigentümlich ist die photochemische Eigenschaft, die unter den organischen [illegible] auch diejenige Modifikation des Eiweiß zeigt, die wir als **Leim** kennen, und es ist [illegible] scheinlich, daß sie gleichfalls beim Aufbau des Pflanzenkörpers mitwirkt. Die Wirkung [illegible] bei dem sogenannten **Pigmentverfahren** in der modernen **Photographie** benutzt. [illegible] licher Leim löst sich nicht in kaltem, wohl aber in erwärmtem Wasser von etwa 30—40°. [illegible] Eigenschaft verliert er, wenn man ihm **Kaliumbichromat** hinzufügt und ihn dem [illegible] aussetzt; er ist dann auch in kochendem Wasser unlöslich geworden, während die [illegible] lichteten Stellen einer entsprechend präparierten Gelatinehaut löslich bleiben. Durch [illegible] Eigenschaft erhält man farbige Abdrücke von photographischen Negativplatten, indem [illegible] Leim eine beliebige, in heißem Wasser beständige Farbe, das Pigment, mischt und [illegible] Papier bestreicht. Taucht man dieses in eine Lösung von Kaliumbichromat, so wird es [illegible] empfindlich. Nachdem man es einige Zeit unter dem Negativ dem Tageslicht ausgesetzt [illegible] entfernt man mit heißem Wasser das nicht vom Lichte getroffene Pigment, und es bleibt [illegible] farbiger Abdruck zurück, der in Wasser, Luft und Licht und auch den meisten chemischen [illegible] wirkungen gegenüber beständig ist. Die Rolle, welche hierbei das Kaliumbichromat [illegible]





ist noch ebensowenig aufgeklärt wie die des Chlorophylls in dem vorher beschriebenen Prozeß. Das Chromsalz geht mit dem Leim keinerlei Verbindung ein, es ist von ihm in der zurückbleibenden unlöslichen Schicht außer mechanischen Beimengungen nichts enthalten. Möglicherweise spielt bei der Bildung des gegen Wasser widerstandsfähigen organischen Gewebes aus Eiweißstoffen ein ähnlicher Vorgang mit wie der hier geschilderte.

Auch sehr einfache unorganische Verbindungen, im Gegensatze zu den vielgliederigen Atomverkettungen in den organisierten Substanzen, haben lichtempfindliche Eigenschaften. Die Verbindungen des Silbers mit den Halogenen Chlor, Brom und Jod werden ja heute fast von jedermann benutzt, um photographische Bilder damit zu erzeugen. Hier ist es nicht das Silber, welches diese Wirkung ausübt, wie die Laien dieser Kunst vielfach glauben, sondern die Halogene, die sich durch das Licht mehr oder weniger leicht aus jeder ihrer Verbindung reißen lassen. Die Silberverbindung ist nur aus praktischen Gründen gewählt. Wir haben auch bereits erfahren (S. 445), daß ein Gemenge von Chlor und Wasserstoff, Chlorknallgas, unter der Einwirkung von Licht explodiert, so daß sich Cl + H in HCl verwandelt. Hier entsteht also eine Verbindung durch das Licht, umgekehrt wie bei jenen organischen Prozessen, bei denen wir eine Spaltung sogar einer sehr eng verknüpften Verbindung beobachteten, wobei der Sauerstoff frei wird. Es ist aber doch möglich, daß die beiden Vorgänge einander ähnlich sind, denn wir beobachteten beim Chlorwasser gleichfalls eine Abscheidung von Sauerstoff. In Wasser gelöstes Chlor zerspaltet unter dem Einfluß des Lichtes die Wassermoleküle, um sich die Wasserstoffatome zur Bildung der oben erwähnten Verbindung HCl, die in Wasser gelöst Salzsäure heißt, anzueignen, wodurch dann Sauerstoff ebenso ausscheiden muß, wie wir es bei den Pflanzen unter dem Einfluß des Chlorophylls beobachten. Auch im Chlorwasser bewirkt also das Licht eine Trennung der sehr festen Verbindung des Wassers, die sonst nur durch heftige Mittel, große Hitze oder elektrische Ströme gelingt. Die Analogie zwischen diesem unorganischen und jenem lebenerhaltenden organischen Vorgang liegt auf der Hand. Auch bei der Verbindung des Chlorknallgases spielt die Gegenwart von Wasser eine wichtige Rolle, die noch nicht genügend aufgeklärt ist. Ganz trockenes Chlorknallgas explodiert nur sehr schwer; um eine Explosion zu ermöglichen, müssen beim Chlorknallgas Spuren von Wasserdampf zugegen sein, dessen Menge bestimmend auf die Heftigkeit der Explosion wirkt. Wahrscheinlich findet zunächst eine Spaltung der Wassermoleküle statt, wie beim Chlorwasser, und bei der Explosion wird der frei gewordene Sauerstoff wieder zu Wasser gebunden.

Auf derselben Wirkung beruhen die bleichenden Eigenschaften des Chlors in organischen Stoffen. Da diese immer Wasserstoff enthalten, so verbindet sich unter dem Einfluß des Lichtes das Chlor mit ihnen und zerreißt dadurch die bestehenden Verbindungen, welche die unreinen oder farbigen Beimengungen bewirkt hatten.

Wir verstehen nun den photographischen Positivprozeß ohne weiteres. Wo das Licht das auf dem Papier ausgebreitete Chlorsilber trifft, tritt eine Verbindung des Chlors mit Wasserstoff ein, und das frei werdende Silber muß sich als schwarzes Pulver dort ablagern. Da nun unterschwefligsaures Natron die Eigenschaft hat, mit Chlorsilber ein lösliches Doppelsalz zu bilden, so braucht man die exponierten Kopien nur mit diesem Stoff in Berührung zu bringen, um alles nicht durch das Licht zersetzte Chlorsilber zu entfernen und das Papier dadurch gegen Licht unempfindlich zu machen, zu „fixieren".

Wenn, abgesehen von den innermolekularen Vorgängen, welche durch die Einwirkungen des Lichtes geschehen, die chemische Erklärung des Positivprozesses keine Schwierigkeiten bietet,

so steht es mit dem Negativprozeß, der immer noch geheimnisvoll geblieben ist, ganz anders. Wir wissen, daß auf der meist mit Bromsilber überzogenen Negativplatte das Bild durch die Belichtung noch nicht erscheint. Die belichtete Platte zeigt auch bei der subtilsten Untersuchung ohne weiteres keinerlei physikalische oder chemische Veränderung. Würde man das Bromsilber wieder von der Platte entfernen und analysieren, so fände man in ihm auch keine Spur einer anderen Verbindung oder von freiem Silber oder Brom, wenigstens soweit unsere Genauigkeit in solchen Prüfungen geht. Übergießt man aber die Platte mit dem sogenannten Entwickler, für den man sehr verschiedene Substanzen anwendet, die alle in dem Punkt einander ähnlich sind, daß sie eine große Neigung haben, aus ihrer Umgebung Sauerstoff an sich zu reißen, um sich mit ihm zu verbinden, so gelingt es durch ihn erst, den Sauerstoff, welcher beim Positivprozeß vom Chlor mit Hilfe des Lichtes frei gemacht wurde, an den belichteten Stellen des Negativs aus dem Silbersalz zu reißen, worauf das Metall sich niederschlägt. Man hat es also hier mit einer sogenannten latenten Lichtwirkung zu tun, die erst nach besonderer Behandlung erkennbar wird.

Es bestand die Meinung, das Licht, welches ja beim Negativprozeß immer nur eine sehr kurze Zeit einwirkt, könne in dieser nur die Moleküle des Salzes gewissermaßen lockern, so daß hier das Silber zwar noch mit dem Halogen verbunden, aber doch leichter zu lösen sei als an den nicht belichteten Stellen. Dies ist eine Ansicht, wie man viele andere aufstellen kann, und die an Stelle einer auf Erfahrungen oder Gesetzmäßigkeiten beruhenden Erklärung bis auf weiteres bestehen konnte. Eine andere Meinung war die, daß durch das Licht doch eine andere Zwischenverbindung hergestellt würde, die nur mit unseren Reagenzmitteln nicht nachweisbar und ihrerseits leichter reduzierbar sei als das Bromsilber. Aber auch hier fischte man buchstäblich im Dunkeln.

In neuerer Zeit aber sind Versuche angestellt worden, die den Negativprozeß in einem ganz neuen Licht erscheinen lassen. Man belichtete eine Bromsilberplatte wie gewöhnlich (nur pflegt man für diese Versuche weniger empfindliche Reproduktionsplatten zu nehmen) und legte nun die unentwickelte Platte in das Fixierbad, wodurch man also alles Silbersalz entfernte, auch das belichtete, weil es ja noch nicht reduziert war. Man sollte nun meinen, daß mit einer solchen vor der Entwickelung fixierten Platte überhaupt nichts mehr anzufangen sei, weil wir ja vorhin erfuhren, daß durch die Belichtung keinerlei chemische Veränderung mit dem Silbersalz vorgegangen ist, so daß also das Fixiersalz nun alle empfindliche Substanz entfernt haben muß. Wenn man aber mit der klar gewordenen, nach vorher allgemeiner Ansicht nur noch die leere Gelatineschicht führenden Glasplatte ins Licht geht und über dieselbe eine Mischung von einem beliebigen Entwickler mit Silbernitrat gießt (welche Mischung man auch sonst zur „Verstärkung“ unterbelichteter Platten anzuwenden pflegt), so erscheint das Bild nicht minder vollkommen als bei dem gewöhnlichen Entwickelungsverfahren, und man hat nun noch dazu den sehr großen praktischen Vorteil, den Entwickelungsprozeß bei vollem Lichte verfolgen zu können. Wie ist diese ganz unglaublich klingende Erscheinung zu erklären? Gar nicht anders, als daß bei der Belichtung sehr geringe Mengen Silbersalz, die innerhalb molekularer Dimensionen liegen, also durch unsere Untersuchungsmethoden nicht mehr nachweisbar sind, wirklich gespalten wurden, so daß metallisches Silber sich in der Gelatineschicht befand. Denn alles Silbersalz wird ja vom Natron unweigerlich entfernt. Diese in der Gelatineschicht eingebetteten Silbermoleküle spielen die Rolle von Kristallen, an welche sich der gleiche Stoff leicht weiter ansetzt. Da jeder Entwickler aus Silbernitrat (Höllenstein) metallisches Silber ausfällt, so setzt sich,

wenn man die Platte mit einer solchen Mischung übergießt, das eben entstehende, naszierende, Silber an die schon durch das Licht ausgeschiedenen Silberatome und erzeugt so das Bild ohne die Einwirkung eines Halogens oder des Lichtes.

Ist diese Erklärung die richtige — und es ist kaum eine andere zu finden — so ist der gewöhnliche Entwickelungsvorgang so zu verstehen, daß der Entwickler, wie es nachgewiesen ist, auch aus dem unbelichteten Silbersalz bereits Silber freimacht (die Platten verschleiern, wenn sie „gequält", d. h. bei Unterbelichtung zu lange im Entwickler gelassen werden), und daß dies an den Stellen, wo sich schon die durch die Belichtung frei gewordenen Silbermoleküle befinden, leichter geschieht als an den anderen, wobei auch elektrische Erscheinungen eine Rolle spielen, wie wir im nächsten Kapitel noch näher sehen werden. Nach neuesten Versuchen von Eder ist es ein Subjodid, resp. Subbromid, welches sich abscheidet und eine Zwischenaktion für die Ausfällung des Silbers ausführt. An unseren Betrachtungen wird dadurch im Prinzip nichts geändert. Durch diese Methode hätten wir eine ziemlich einfache Erklärung der chemischen Vorgänge beim photographischen Prozesse gefunden, der nur noch, wie eigentlich überall, die innermolekularen Vorgänge unaufgeklärt läßt.

Die photochemischen Wirkungen des Chlors, wie wir sie bei der Photographie benutzen, hat man nun benutzt, um einen Maßstab für andere photochemische Wirkungen, einen Aktinometer, zu konstruieren. Im Prinzip kommt ihre Anwendung auf die der photographischen Photometer heraus, die die benutzte Lichtmenge nach der gradweisen Schwärzung empfindlichen Papiers bei verschiedener Bedeckung durch lichtabsorbierende Stoffe, z. B. Lagen dünnen Papiers, bemessen.

Photochemische Wirkungen kommen nicht etwa bloß bei den hier genannten Verbindungen vor; es gibt deren vielmehr eine sehr große Menge, nur sind sie meist wesentlich weniger empfindlich als die genannten. Wie schon angedeutet, ist das Bleichen der meisten Farbstoffe an der Sonne eine photochemische Wirkung, die namentlich bei den „verschießenden" Kleiderstoffen ungern bemerkt wird. Das Eingreifen des Lichtes in das atomistische Gewebe ist also viel allgemeiner, als man es wohl bei oberflächlicher Betrachtung meint.

In neuerer Zeit hat Goldstein in dieser Hinsicht eine recht interessante Entdeckung gemacht, indem er nachwies, daß ultraviolettes Licht, ebenso wie alle die neuen Strahlenarten, einer großen Anzahl von Stoffen bestimmte Färbungen (Nachfarben) erteilen, die sie bei gewöhnlichem Licht oder bei Erwärmung wieder verlieren. Hier haben wir also eine umkehrbare Lichtwirkung vor uns; die Gruppierung, welche durch kurzwelliges Licht erzeugt wurde, wird durch langwellige Strahlen wieder zerstört.

Es zeigt sich auch, daß es Stoffe gibt, die für die eine Art von Licht empfindlicher sind als für die anderen, und die Erfahrung des Photographen, der seine Stoffe für die kurzen blauen Wellen empfindlicher weiß als für die roten, läßt sich keineswegs allgemein anwenden.

Eder hat alle bezüglichen Untersuchungen gesammelt und folgende zusammenfassende Sätze daraus abgeleitet (Nernst, „Theoretische Chemie", S. 685):

1) Licht jeder Wellenlänge, von den infraroten bis zu den ultravioletten Strahlen, ist einer photochemischen Wirkung fähig.

2) Nur solche Strahlen können wirksam sein, die vom System absorbiert werden, so daß die chemische Lichtwirkung eng mit der optischen Absorption verknüpft ist; umgekehrt aber bedingt natürlich optische Absorption durchaus nicht notwendig chemische Wirkung.

3) Je nach der Natur des lichtempfindlichen Stoffes kann jede Lichtsorte oxydierend oder reduzierend wirken; doch läßt sich im allgemeinen sagen, daß das rote Licht auf metallische Verbindungen meistens oxydierend, das violette Licht dagegen meistens reduzierend wirkt. Der Fall, daß das rote Licht auf metallische Verbindungen mitunter auch reduzierend wirken kann, tritt namentlich bei der latenten Lichtwirkung der Silbersalze ein; eine oxydierende Wirkung der violetten Strahlen auf metallische Verbindungen ist bis jetzt nicht mit Sicherheit beobachtet worden. — Auf Verbindungen der Metalloide untereinander scheint fast immer das violette und blaue Licht am kräftigsten einzuwirken, wie z. B. auf Chlorknallgas, Salpetersäure, schweflige Säure, Jodwasserstoff u. s. w., doch wird Schwefelwasserstoffwasser durch rotes Licht rascher zerstört. Die Lichtwirkung ist je nach der Natur der Substanz teils oxydierend, teils reduzierend. Auf organische Verbindungen (namentlich farblose) wirkt in den meisten Fällen das Violett am stärksten oxydierend ein; Farbstoffe werden von den Lichtstrahlen am stärksten oxydiert, welche sie absorbieren.

4) Nicht nur die Absorption der Lichtstrahlen durch den belichteten Körper selber, sondern auch die Absorption beigemengter Stoffe spielt häufig eine wichtige Rolle, indem die Lichtempfindlichkeit des ersteren für jene Strahlen, welche die letzteren absorbieren, gesteigert werden kann (optische Sensibilisation).

5) Eine dem lichtempfindlichen Körper beigemengte Substanz, welche eines der bei der photochemischen Reaktion entstehenden Produkte (Sauerstoff, Brom, Jod u. s. w.) bindet, befördert dadurch, daß sie die Rückbildung unmöglich macht, die Reaktionsgeschwindigkeit (chemische Sensibilisation).

Auf der unter 4 angeführten Eigentümlichkeit der photochemischen Wirkung beruht die der sogenannten farbenempfindlichen Emulsionen.

8. Chemischer Zustand und Elektrizität.

Zu den eigenartigsten und zugleich für die Erkenntnis der molekularen Vorgänge bedeutungsvollsten Erscheinungen gehören die Wechselwirkungen zwischen der strömenden Elektrizität und dem chemischen Zustand der Materie. Bei dem Zusammenbringen verschiedenartiger Stoffe beobachteten wir fast immer chemische Wirkungen, die zum Teil auch von Wärme- und Lichtwirkungen begleitet waren; niemals aber traten ohne weiteres elektrische Erscheinungen auf. Diese waren immer erst zu bemerken, nachdem zwischen zwei verschiedenen Paaren von sich berührenden Körpern eine sogenannte leitende Verbindung hergestellt worden war, wie bei den verschiedenen Arten von galvanischen Batterien, wo, z. B. beim Daniell-Element, das eine Paar aus Zink und verdünnter Schwefelsäure, das andere aus Kupfer und Kupfersulfatlösung besteht. Hier ist weder beim Zink noch beim Kupfer eine elektrische Wirkung zu konstatieren, solange beide voneinander getrennt bleiben. Dagegen ist, wenigstens beim Zink, eine chemische Wirkung vorhanden: das Zink löst sich in der Schwefelsäure und bildet Zinksulfat. Sind beide Paare von „chemischen Systemen" in getrennten Gefäßen aufgestellt, so wird auch dann noch keine andere Wirkung beobachtet, wenn man das Zink mit dem Kupfer in Verbindung bringt. Geben wir aber den beiden Flüssigkeiten, dem sehr verdünnten Zinksulfat und dem konzentrierten Kupfersulfat, die Möglichkeit, ineinander zu diffundieren, also ihrem osmotischen Drucke nachzugeben, so beginnt alsbald in der metallischen Verbindung zwischen Zink und Kupfer der galvanische Strom zu fließen, während in den chemischen Systemen

Veränderungen vor sich gehen, die vorher nicht bemerkt worden waren. Die Auflösung des Zinks geht auf diese Weise wesentlich rascher vor sich als ohne metallische Verbindung oder bei „offener Kette", wie wir diese Verbindung gegenüber der geschlossenen fachmännisch nannten. Aus der Kupfersulfatlösung setzt sich bei geschlossener Kette Kupfer auf dem auf dieser Seite schon vorhandenen Kupfer, der Anode, ab. Es gehen hier also mit der Entstehung und Fortbewegung des galvanischen Stromes chemische Prozesse parallel, die bei offener Kette entweder gar nicht oder mit viel geringerer Intensität stattfinden. Beide Erscheinungen sind einander offenbar koordiniert und halten sich in der galvanischen Batterie das Gleichgewicht; aber es ist von vornherein durchaus nicht zu sagen, welche von beiden die Ursache der anderen ist.

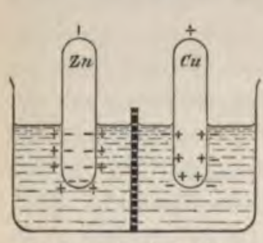
Es sind sowohl chemische Wirkungen ohne Elektrizität als auch elektrische Wirkungen ohne chemischen Umsatz hervorzurufen. Letztere treten z. B. durch die mechanischen Massenbewegungen in den Dynamomaschinen in bedeutend größeren Mengen ein, als es die molekularen Bewegungen während der chemischen Reaktionen in den galvanischen Batterien bei einem gleichen Aufwand von Mitteln jemals fertig brächten. Mit diesen stärkeren elektrischen Mitteln, die somit nicht auf chemische Arbeit zurückzuführen sind, gelingt es sogar, den chemischen Prozeß in den galvanischen Elementen völlig umzukehren. Leiten wir in ein Daniell-Element einen Strom in umgekehrter Richtung, als sie das Element ihm geben würde, und ist dieser eingeleitete Strom stärker als der im Element entstehende, so kehrt sich auch die chemische Wirkung in ihm um: es löst sich Kupfer von der Anode und geht als Kupfersulfat in Lösung, während sich Zink aus der Zinksulfatlösung auf der Kathode niederschlägt. Der Vorgang ist hier also durchaus umkehrbar. Wir überschreiten in der einen wie in der anderen Richtung ebenso leicht die Grenze zwischen dem physikalischen und dem chemischen Gebiet. Aber dabei ist es schwer zu entscheiden, wo diese Grenze eigentlich liegt, und dies ist gerade für uns der wichtigste Punkt, wenn wir uns eine Anschauung davon machen wollen, wie hier die eine Energieform in die andere übergeht.

Chemische Vorgänge beobachten wir nur zwischen den beiden Elektroden in der sie verbindenden Flüssigkeit, dem „Elektrolyten", oder Leiter zweiter Ordnung. In der den Strom hinüberleitenden metallischen Verbindung bewirkt selbst der stärkste Strom keine stoffliche Veränderung. Umgekehrt aber ist die elektrische Wirkung keineswegs nur auf diesen Teil der Bahn unseres Kreislaufes beschränkt. Auch der Elektrolyt ist nach Stromschluß elektrisch, wie es nach unseren Erfahrungen auch nicht anders denkbar ist, weil der galvanische Strom überall, wo er auftritt, immer eine geschlossene Bahn fordert. Hiernach scheint es, als ob der elektrische Vorgang der ursprüngliche sei, der den chemischen nur auslöst und sich durch ihn verstärkt. Wir haben ja auch gesehen, daß die bloße Berührung zweier verschiedener Metalle Elektrizität aus ihnen hervorlockt, ohne daß eine chemische Wirkung dabei beobachtet würde. In unserem elektrischen Kapitel haben wir einmal gesagt (S. 329), daß überhaupt jede Berührung zweier verschiedenartiger Körper Elektrizität erzeugen müsse. Ist dies richtig, so müßten auf der anderen Seite auch alle chemischen Erscheinungen, bei denen doch immer verschiedene Körper sogar sehr eng zusammentreffen, Elektrizität hervorbringen. Dies beobachten wir jedenfalls zunächst nicht, aber auch sonst nimmt man nur selten bei Berührung Elektrizität wahr, weil sie sich meist entweder gegenseitig bindet oder durch sofortige Ableitung verloren geht, was man aber immer verhindern kann. Mögen wir eine galvanische Batterie auch auf das sorgfältigste isolieren, so tritt bei offener Kette keine merkliche Elektrizität auf. Es bleibt also die Frage übrig, ob bei bloßem Eintauchen der betreffenden

Metalle oder überhaupt eines Metalles in einen Elektrolyten sich die Elektrizitäten zwar bereits scheiden, aber sich so lange gegenseitig binden, bis ihnen die Ableitung möglich gemacht wird, d. h. bis man die Kette schließt. Beim Eintauchen einer Zinkplatte in verdünnte Schwefelsäure könnte wohl das Metall an der Berührungsstelle negativ, die Flüssigkeit positiv elektrisch werden, ohne daß wir davon etwas bemerken, weil die beiden Elektrizitäten sich wie die Beläge einer Leidnerflasche einander festhalten (s. die nebenstehende Abbildung). Die Verhältnisse werden auch dann noch nicht anders, wenn man vom Zink oder dem Elektrolyten oder von beiden aus eine Ableitung macht, die man etwa mit einem Galvanometer verbindet. Ein Strom könnte immer noch nicht eintreten, weil keine der beiden Elektrizitäten dadurch Veranlassung gewinnt, ihre gegenseitig gebundene Lage zu verlassen. Das muß aber von dem Augenblick an anders werden, in welchem wir in diese elektrolytische Lösung ein Metall tauchen, das die Eigenschaft hat, durch die Berührung mit ihr in umgekehrter Weise die Elektrizitäten zu trennen, so daß die negative am Metall, die positive an der Flüssigkeit haftet. Wir wissen, daß es derartig verschieden wirkende Metalle gibt, auch abgesehen von den Erfahrungen an galvanischen Strömen, die wir hier erst noch näher zu prüfen haben. Tauchen wir Kupfer zunächst in das mit dem Elektrolyten angefüllte Gefäß, den sogenannten „Trog“, der bereits die Zinkplatte enthält, wobei wir voraussetzen, daß schon hierdurch die Elektrizitäten in umgekehrter Weise gespalten werden wie vom Zink, so entsteht nun eine Spannung zwischen Kupfer- und Zinkplatte, die innerhalb des Troges die positive Elektrizität nach der Kupfer-, die negative nach der Zinkseite hinzutreiben sucht. Aber diese Spannung kann zunächst auch jetzt noch nicht in Erscheinung kommen, weil kein Druckunterschied, keine „Potentialdifferenz“ zwischen beiden Seiten vorhanden ist (s. die untenstehende Abbildung). Würde auch auf dieser Seite mehr von der einen Elektrizität erzeugt als von der anderen auf jener Seite, so würde sie nach ihrer Hinüberwanderung dort sofort eine entsprechende Menge Elektrizität durch ihre polare Wirkung spalten und einen Gleichgewichtszustand hervorrufen, der in allen sich selbst überlassenen Systemen ja stets eintreten muß. Sowie wir nun aber die beiden Metalle außerhalb des Elektrolyten miteinander verbinden, kann die in der Zinkplatte angesammelte negative Elektrizität sich mit der positiven der Kupferplatte ausgleichen, wodurch für die Wanderung der positiven Elektrizität innerhalb des Elektrolyten vom Kupfer zum Zink die nötige Potentialdifferenz geschaffen wird. Die Bahn für den Kreislauf ist nun geschlossen, und der Strom wird so lange fließen, wie die molekularen Veränderungen andauern, die offenbar mit seiner Bewegung parallel laufen, weil keine andere Ursache für das Auftreten jener elektrischen Kraft in dem ganzen System zu finden ist. Wir kommen zu der Überzeugung, daß die **Berührung zweier verschiedener Stoffe** auch bei der vorliegenden Versuchsanordnung wohl **statische, unbewegte Elektrizität erzeugen kann, nicht aber strömende**, und daß die **Ursache der letzteren die eintretenden chemischen Veränderungen im Elektrolyten** sein müssen.



Spaltung der Elektrizitäten im Elektrolyten.



Entstehung elektrischer Spannung im Elektrolyten beim Eintauchen verschiedener Metalle.

Um hierin möglichst klare Verhältnisse zu schaffen, machen wir die Elektroden aus **Platin**, das bekanntlich chemisch fast gar nicht angegriffen wird. Ferner wenden wir einen

anderweitig erzeugten elektrischen Strom an, um in dem Elektrolyten dadurch kräftigere Wirkungen hervorzubringen, nachdem wir uns überzeugt haben, daß diese Wirkungen bei bestimmter Stromrichtung qualitativ den durch eine entsprechende galvanische Batterie selbst erreichten gleichen. Wir benutzen als Elektrolyten zunächst ganz reines Wasser. Dann zeigt es sich, daß nur sehr geringe Mengen von Elektrizität durchgeleitet werden, denn ganz reines Wasser ist ja ein sehr schlechter Leiter. Eine solche galvanische Batterie würde fast keine Wirkung haben. Sobald wir aber das Wasser mit etwas Salzsäure versetzen, entsteht bei einiger Stromstärke eine sehr heftige Gasentwickelung an beiden Elektroden. An der Anode, wo die positive Elektrizität eintritt, ist das Gas Chlor, auf der anderen, der Kathode, Wasserstoff, denn Salzsäure ist eine Lösung von Chlorwasserstoff in Wasser und sein Anhydrit schreibt sich HCl. Brächten wir dieses Gas zwischen die Elektroden, so würde die durch den Strom im vorigen Falle bewirkte Trennung nicht stattfinden. Es muß also durchaus in wässeriger Lösung vorhanden sein, obgleich das Wasser allein wieder keine Wirkung zeigt.

Die beiden entwickelten Gase werden in gleichen Raummengen ausgeschieden, es haben sich also gleiche Mengen von Molekülen HCl in ihre einwertigen Atome zerspalten. Dies ist sehr merkwürdig, denn hätte die Elektrizität ohne weiteres die Kraft, die chemischen Moleküle zu spalten, so müßten, wenn auch die eine Art von Elektrizität nur immer die eine Art von Atomen an sich reißen könnte, doch zugleich auch die anderen Atome frei werden, weil sie in dem gegebenen Falle sich mit einem anderen Stoffe nicht verbinden. Es würden also an beiden Elektroden zugleich beide Gase entweichen oder an einer allein, aber immer beide vermischt. Wenn ferner die Elektrizität die Scheidung gleich vollständig an den Elektroden vollziehen würde, so fehlte uns wieder die Ursache für den Elektrizitätstransport von einer zur andern Elektrode, denn die elektrische Kraft müßte durch diese Spaltung aufgebraucht werden. Die entweichenden Gase sind nicht elektrisch geladen. Bleiben wir zunächst bei der von Faraday aufgestellten Hypothese von den beiden elektrischen Fluida, die in den elektrisch indifferenten Zuständen der Materie sich gegenseitig binden, so finden wir die Erklärung für den betrachteten Vorgang nur so, daß wir dem Chloratom die eine, dem Wasserstoffatom die andere Elektrizität stets anhaftend denken, wodurch sie sich gewöhnlich als Molekül zusammenhalten. Durch die Einwirkung der positiven Elektrizität an der Anode wird das negativ elektrische Chloratom aus seinem molekularen Verband gerissen; bei seiner Vereinigung mit der Anode werden die dieser aus dem Chlor anhaftenden Elektrizitäten ausgeglichen, und das Gas kann nun in elektrisch neutralem Zustand ausscheiden. Das losgelöste Wasserstoffatom ist also positiv geladen und wird darum von der Umgebung der Anode in der Richtung der Kathode abgestoßen, weil hier das größte Potentialgefälle für seine Ladung besteht. Dabei aber verbindet es sich offenbar mit einem anderen noch nicht gespaltenen Molekül, da es nicht gasförmig wird, und tritt mit diesem zusammen seine Wanderung von der Anode zur Kathode an. Dort angekommen, kann nun das nur lose mit seinem Träger verbundene Wasserstoffatom, angezogen von der hier vorhandenen entgegengesetzten Elektrizität, diese ausgleichen, wird neutralisiert und ebenfalls frei. Genau umgekehrt ist der Vorgang beim Chlor. Auf der Kathode wird sofort Wasserstoff abgeschieden, der sich mit dem von der Anode hergewanderten vermischt; das abgespaltene Chlor aber wandert zur Anode. Es müssen also bei diesem Vorgang im Elektrolyten ganz besonders gebildete Moleküle vorhanden sein, von denen der einen Art ein negativ geladenes Chloratom, der anderen Art ein positiv geladenes Wasserstoffatom angehängt ist, ohne mit ihm eigentlich chemisch verbunden zu sein.

Faraday hatte sich elektrische Atome gedacht, die sich an die chemischen Atome oder Moleküle heften, und nannte diese elektrischen Atome Jonen, und zwar das positiv elektrische Anion und das negative Kation. Wir führen für dieselben die Symbole ⊕ und ⊖ ein und schreiben für unsere wandernden elektrischen „ionisierten" Atome im Elektrolyten H⊕ und Cl⊖. Diese Anschauungsweise wollen wir einstweilen beibehalten, da sie die allgemein übliche ist, und erst nach der Aufzählung weiterer Erfahrungen auf unsere, bereits in unserem physikalischen Kapitel über die elektrischen Erscheinungen entwickelte rein mechanische Hypothese zurückkommen.

Bei jener elektrolytischen Spaltung werden offenbar immer nur gleiche Mengen von Elektrizität nach jeder Seite transportiert, weil ja ein Kreislauf stattfindet, in dem überall nur gleiche Spannungen vorhanden sein können. Würde auf die eine Seite dauernd mehr Elektrizität befördert werden als auf die andere, so müßten sich hier nach und nach unendlich große Elektrizitätsmengen ansammeln, die am Kreislauf nicht teilnehmen. Wir sehen also, daß in unserem besonderen Fall ein Wasserstoff-Jon ebensoviel Elektrizität enthalten muß, nur mit dem umgekehrten Zeichen, wie ein Chlor-Jon. Dies ist nicht ohne weiteres verständlich, denn ein Chloratom enthält 35mal mehr Masse als ein Wasserstoffatom, weil es ebensoviel schwerer ist. Es sollte also um so viel mal mehr Kapazität besitzen, trägt aber trotzdem nicht mehr Elektrizität, beziehungsweise vermag nicht mehr zu erzeugen als jenes. Dies findet sich nun ganz allgemein bestätigt. Wir können eine noch so verwickelte chemische Verbindung elektrolytisch immer nur in zwei Atomgruppen spalten, von denen die eine die positive, die andere die negative Elektrizität trägt, und immer sind diese beiden Gruppen gleich stark entgegengesetzt geladen. Nehmen wir z. B. statt der Salzsäure Schwefelsäure, H_2SO_4, so spaltet sich diese in die beiden Gruppen H_2 und SO_4; hier ist jedes H-Atom mit der gleichen Menge positiver Elektrizität geladen, also muß die andere Gruppe SO_4 zusammen die doppelte Menge der umgekehrten Elektrizität enthalten, wie ein Wasserstoff-Jon. Um hier die elektrolytische Dissoziation symbolisch auszudrücken, haben wir zu schreiben $H_2SO_4 = H\oplus + H\oplus + SO_4\ominus\ominus$. Wir sehen, daß diese „Jonisierung" etwas gemein hat mit der chemischen Wertigkeit. Es müssen immer gleichviel Valenzen auf jeder Seite gesättigt sein; für jedes Kation der beiden Wasserstoffatome hängt sich an die andere Gruppe, der Schwefelsäurerest SO_4, ein Anion. Das Wasserstoffatom ist also auch elektrolytisch einwertig, der Schwefelsäurerest zweiwertig, wie es auch chemisch der Fall ist.

Gleiches zeigt sich bei allen elektrolytischen Dissoziationen. Zersetzen wir z. B. Natron, NaOH, so zerfällt es in Natrium und die Hydroxylgruppe OH; dabei ist das erstere positiv, das letztere negativ geladen. Wir haben also $NaOH = Na\oplus + OH\ominus$. Beide sind auch chemisch einwertig. Haben wir aber Bariumhydroxyd, $Ba(OH)_2$, zersetzt, so erscheint wieder jedes „Hydroxyl-Jon" OH⊖ negativ geladen, während das abgeschiedene Barium doppelt geladen wird, Ba⊕⊕, wie dieses Element auch chemisch zweiwertig ist.

Liegt eine ungesättigte Verbindung vor, so kann die eine Gruppe immer nur so viel Elektrizität aufnehmen, als sich gleichartige Atome an sie gehängt hatten, sie kann also unter Umständen ihre elektrische Wertigkeit ändern. So gibt es ein Ferrochlorid $FeCl_2$, bei dem das sonst dreiwertige Eisen nur zwei seiner Valenzen gesättigt hat. Spaltet man diesen Stoff elektrolytisch, so kann das Eisenatom natürlich für die beiden negativen Chlor-Jonen nur zwei Kationen aufnehmen, es wird elektrisch zweiwertig. Aber es gibt auch ein Ferrichlorid $FeCl_3$, bei dessen Spaltung das Eisen seine normale Dreiwertigkeit auch elektrolytisch zeigt. Vergegenwärtigen wir uns

noch einmal, daß durch die elektrolytische Dissoziation überhaupt nur elektrisch gleichwertige Gruppen geschieden werden können, also die getrennten Gruppen elektrisch gleichwertig sein müssen, daß ferner die Trennung meistens dort erfolgen wird, wo auch die chemische Trennung am leichtesten stattfindet, wo also die chemischen Gruppen sich mit ihren chemischen Valenzen gleichwertig auf beiden Seiten gesättigt haben, so ist diese Übereinstimmung der chemischen und elektrischen Wertigkeit klar, und die auftretenden Abweichungen werden sich immer durch besondere Umstände erklären lassen. Gerade deshalb aber vermuten wir, daß der eine Vorgang den andern als eine notwendige Folge einschließt, und daß die elektrischen Vorgänge aus den chemischen oder umgekehrt zu erklären sind. Es ist von der größten Wichtigkeit für das Verständnis dieser beiden großen Gruppen von Naturvorgängen, diese Beziehungen weiter zu verfolgen.

Durch die elektrolytische Dissoziation müssen auf beiden Seiten immer chemisch gleichwertige (äquivalente) Mengen von Stoffen ausgeschieden werden. Dies ist das von Faraday gefundene und nach ihm benannte Grundgesetz der Elektrolyse. Es sei hierzu jedoch gleich bemerkt, daß in der Praxis diese gleichwertigen Mengen nicht immer in die Erscheinung zu treten brauchen, da sich der betreffende abgeschiedene Stoff sofort wieder mit einem andern gegenwärtigen verbinden kann. Selbstverständlich ist dies stets chemisch zu erkennen und für die Theorie zu berücksichtigen. Beim elektrolysierten Wasser z. B. sind die beiden auftretenden Jonen eigentlich $H\oplus$ und $OH\ominus$. Die Hydroxyl-Jonen sättigen sich nun durch Spaltung von nicht elektrischen Wassermolekülen, um ihrerseits wieder Wasser zu bilden. Bei diesem Vorgang werden Sauerstoffatome frei.

Bei dem Daniell-Element ist der Vorgang der folgende. Durch das Eintauchen von Zink in verdünnte Schwefelsäure verbindet sich der Schwefelsäurerest mit dem Zink zu Zinksulfat, $ZnSO_4$, wodurch mehr und mehr SO-Gruppen gebunden werden. In der Nebenzelle befindet sich, nur durch die osmotische Wand getrennt, Kupfersulfat in konzentrierter Lösung. Der osmotische Druck allein würde zwar nicht genügen, die an das Kupfer gebundenen SO_4-Gruppen hinüber zu bringen. Da diese sich aber durch die Berührung mit dem Kupfer abspalten und negativ laden, so wandern sie, durch den osmotischen Druck unterstützt, durch die Zellwand zum Zink hinüber, und für jede dieser Gruppen setzt sich das frei werdende Kupfer an das schon vorhandene an. Die Kupfersulfatlösung wird somit durch den elektrolytischen Vorgang immer ärmer an SO_4-Gruppen, immer verdünnter, die Zinksulfatlösung dagegen immer konzentrierter. Diese wird, um die Wirkung zu steigern, möglichst verdünnt angesetzt, die Kupfersulfatlösung dagegen möglichst konzentriert, weil dann auch der osmotische Druck zur Wanderung der Jonen noch beiträgt. Die Wanderung und damit der galvanische Strom hört auf, wenn die Zinksulfatlösung gesättigt oder auf der anderen Seite alles Kupfer aus der Lösung niedergeschlagen ist. Deshalb richtet man diese galvanischen Elemente so ein, daß stets festes Kupfersulfat mit seiner Lösung in Berührung bleibt, so daß diese sich immer wieder konzentriert. Dann kann auch die Zinksulfatlösung sich niemals sättigen, solange noch metallisches Zink zugegen ist, weil immer genügend viele Säurereste hinübergetragen werden. Bei diesem Vorgang entweichen keine Stoffe aus dem System. Somit können wir vorhersagen, daß immer äquivalente Mengen von Zink und Kupfer an dem Vorgang beteiligt sind. Findet man z. B., daß nach einer bestimmten Zeit sich 63,6 g Kupfer niedergeschlagen haben, so kann man vorhersagen, daß 65,4 g Zink gelöst worden sind, weil diese Zahlen die Atomgewichte der beiden Metalle sind.

Aus den bisherigen Ermittelungen geht hervor, daß die Elektrizitätsmenge, welche ein Grammäquivalent irgend eines Stoffes auszuscheiden vermag, immer dieselbe sein muß. Unter

Grammäquivalent verstehen wir dabei die Anzahl von Grammen, welche numerisch dem Atom-, bzw. Molekulargewicht des Stoffes entspricht. So ist ein Grammäquivalent des zweiatomigen freien Wasserstoffes gleich 2 g, das des gewöhnlichen Sauerstoffs gleich 32 g u. s. w. Die Elektrizitätsmenge, welche von einem solchen Grammäquivalent ausgeschieden wird, ist experimentell zu 96,540 Ampèresekunden oder Coulombs ermittelt und zu Ehren Faradays ein „Farad", mit dem Symbol F, genannt worden.

Bei der Scheidung in die positive und negative Gruppe stellt sich heraus, daß eine gewisse Anzahl von Elementen und Atomgruppen immer nur positiv, andere negativ geladen auftreten, während eine dritte Klasse in dieser Hinsicht veränderlich ist, je nachdem der betreffende Stoff mit einem positiven oder negativen Element vor der Scheidung verbunden war, dessen entgegengesetzte Elektrizität er annimmt. Entschieden positiv verhalten sich alle Metalle, mit Wasserstoff an der Spitze, also alle im natürlichen System (S. 510) links stehenden Elemente, die drei dreifachen Gruppen des Eisens, Rutheniums und Platins eingeschlossen, die im System zwischen links und rechts eine besondere Stellung einnehmen. Negativ sind alle rechts stehenden Elemente, insbesondere die Halogene. Die Körper, deren Jonen ein wechselndes Vorzeichen haben können, liegen im System in der Mitte, z. B. der Kohlenstoff.

Die Horizontalreihen des periodischen Systems stellen also elektrolytische Spannungsreihen dar, wie wir sie für die Berührungs- und Reibungselektrizität auch aufgestellt hatten. Die in einer Horizontalreihe am weitesten voneinander entfernten Elemente, die also die größten entgegengesetzten Ladungen annehmen können, binden sich auch chemisch am festesten, z. B. die Komponenten beim Fluorwasserstoff oder Chlornatrium, und die dabei gebildeten Körper sind von den Komponenten durchaus verschieden. Dagegen bilden die Stoffe mit gleichem Vorzeichen ihrer Jonen, wie die Metalle, nur Verbindungen, in deren Eigenschaften man die zusammengetretenen Stoffe mehr oder weniger wieder erkennt. Hieraus können wir vermuten, daß jene elektrischen Eigenschaften eine wichtige Rolle bei den chemischen Vorgängen spielen.

Im engsten Zusammenhang mit diesen Beziehungen stehen auch die Spannungen, die erforderlich sind, um die verschiedenen chemisch miteinander verbundenen Elemente oder Gruppen elektrolytisch voneinander zu trennen. Nach Wilsmore setzt sich die Spannungsreihe aus folgenden Zahlen zusammen.

Zersetzungsspannungen nach Wilsmore für normale Konzentrationen ($H = \pm 0$).

Kationen.				Anionen.	
Magnesium	+1,482	Kobalt	+0,232	Jod	−0,520
Aluminium	+1,276	Nickel	+0,228	Brom	−0,993
Mangan	+1,075	Blei	+0,151	Sauerstoff	−1,08
Zink	+0,770	Kupfer	−0,329	Chlor	−1,417
Kadmium	+0,420	Quecksilber	−0,753	OH	−1,68
Eisen	+0,344	Silber	−0,771	SO_4	−1,9
				HSO_4	−2,6

Die Zahlen sind in Volt ausgedrückt und geben an, wieviel Spannungsdifferenz (auch Klemmspannung genannt) an einer Elektrode vorhanden sein muß, damit sich der betreffende Stoff elektrolytisch aus einer beliebigen Verbindung abscheiden kann, wobei natürlich gleichzeitig die Gegenkraft in Rechnung zu ziehen ist, die bei der andern Elektrode auftritt und dem andern Jon entspricht. Haben wir z. B. Eisenchlorid zu elektrolysieren, so gehört dazu für Eisen +0,344, für Chlor −1,417, zusammen also 1,76 Volt

Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden. Da in einem Daniell-Element Kupfer abgeschieden wird, wozu eine Zersetzungsspannung von —0,33 gehört, während auf der andern Elektrode die Spannung des Zinks mit +0,77 vorhanden ist, so muß dieses galvanische Element eine Spannungsdifferenz, gleichbedeutend mit seiner elektromotorischen Kraft oder Stromspannung von 0,77+0,33=1,1 haben, was mit den direkten Messungen übereinstimmt. Ein Daniell-Element genügt also nicht, um Eisenchlorid zu spalten.

Tonerde ist Aluminiumoxyd, Al_2O_3. Aus unserer Tabelle ist zu ersehen, daß eine Spannungsdifferenz von 1,276+1,08=2,36 Volt genügen wird, um das Aluminium elektrolytisch auszuscheiden. Eine solche Spannung ist natürlich ganz leicht zu erzeugen, aber leider ist Tonerde unlöslich und deshalb nicht ohne weiteres elektrolytisch zu behandeln, denn die Jonen müssen ja, um von der einen Elektrode zur anderen wandern zu können, flüssig sein. Darin liegt die große Schwierigkeit der elektrolytischen Herstellung des Aluminiums, die durch Verfahren, die immer noch geheim gehalten werden, allein möglich wurde. In anderen Fällen, bei denen es sich zwar um leicht lösliche Verbindungen leichter Metalle, wie Chlornatrium, Kochsalz, handelt, gelingt die direkte Spaltung deshalb nicht, weil das freiwerdende Metall sich sofort wieder in dem Lösungsmittel, dem Wasser, oxydiert. Auf der negativen Seite wird wohl das Chlor frei, auf der positiven Seite aber bildet sich Wasserstoff, den das Natrium bei seiner Verbindung mit dem Sauerstoff des Wassers freimacht, wodurch Natron entsteht.

Da die Löslichkeit eine wesentliche Rolle bei den elektrolytischen Prozessen spielt, so müssen diese auch, wie wir schon angedeutet haben, mit dem osmotischen Druck eng zusammenhängen. Die Jonen wandern von einer Elektrode zur anderen. Durch diesen Vorgang muß, selbst wenn beide in ein und demselben Behälter ohne Scheidewand aufgestellt sind (Konzentrationsketten), eine verschiedene Konzentration der elektrolytischen Lösung entstehen, weil auf jeder Seite ein verschiedener Stoff ausscheidet. Es tritt somit osmotischer Druck ein, der offenbar dem elektrischen Potentialgefälle entgegenwirkt, denn dieses hat ja die verschiedene Konzentration hervorgerufen, während der osmotische Druck eine solche immer auszugleichen sucht. Ein Strom kann also erst entstehen, wenn seine motorische Kraft größer ist als die des osmotischen Druckes. Auch noch andere Umstände wirken der Stromerzeugung entgegen; man sagt, die galvanische Batterie polarisiert sich. Um dies zu vermeiden, hat man die mehrerwähnten Tonzellen eingeführt, mit deren Hilfe man die Konzentrationen der die Elektroden umgebenden Flüssigkeiten so einrichten kann, daß der osmotische Druck sogar den Transport der Jonen fördert und so zu einer die Elektrizität miterzeugenden Kraft wird. Außerdem kann durch ihn die chemische Gegenwirkung eingeschränkt werden.

Aber der osmotische Druck betätigt sich in noch ganz anderer Weise bei der Entstehung des galvanischen Stromes in den Batterien. Es wurde nämlich gefunden, daß er in den wässerigen Lösungen für die meisten Stoffe ein abnormer ist. Wir haben bei der Behandlung dieses Vorganges (S. 533), der in so viele Gebiete des Naturgeschehens ganz unerwartet Licht geworfen hat, gesehen, daß er uns über die Anzahl von Molekülen Auskunft gibt, die in einer verdünnten Lösung enthalten sind. Je mehr Moleküle vorhanden sind, desto größer ist der Druck, den man aus den hierfür gefundenen Gesetzmäßigkeiten sofort berechnen kann. Er ist z. B. bei Auflösung von Schwefelsäure in viel Wasser dreimal größer, als aus der Formel H_2SO_4 hervorgeht. Aus diesem einen Molekül sind also drei geworden, oder durch die Lösung allein hat sich eine Dissoziation vollzogen, und diese drei einzelnen Teile können nur je ein gesondertes Wasserstoffatom und der Säurerest sein. Die Dissoziation durch Lösung in Wasser,

hydrolytische Dissoziation, hat sich im Sinne der Formel $H_2SO_4 = H + H + SO_4$ vollzogen. Wir haben uns zu denken, daß die starke Verdünnung, die hier vorausgesetzt wird, einen großen Zug auf die Moleküle ausübt, wie wenn wir entsprechend ein Gas, etwa durch Hinzufügung von Wärme, ausdehnen, wodurch ja auch Dissoziation eintritt. Aber die abgespalteten Atome oder Gruppen treten in der Lösung nicht frei auf, sondern sind an die Wassermoleküle gebunden, denn sie bleiben ja in Lösung. Ähnliches findet auch bei der Auflösung von Chlorwasserstoff in Wasser statt. Hier zeigt sich der osmotische Druck doppelt so groß, als er sein sollte: es hat also eine Spaltung $HCl = H + Cl$ stattgefunden. In anderen als wässerigen Lösungen, z. B. den alkoholischen, treten diese abnormen „Dampfdrucke", denn diese Bezeichnung darf man nach vorhergehenden Betrachtungen für osmotischen Druck setzen, nicht auf; sie sind überhaupt auf diejenigen Lösungen beschränkt, die sich zugleich als Elektrolyte auszeichnen. Auch diese elektrischen Vorgänge stehen demnach wieder im engen Zusammenhang mit der **kinetischen Gastheorie**, die die Gesetze des osmotischen Druckes geliefert hat, und die ihrerseits auf unserer Grundanschauung von der geradlinigen, gleichmäßig schnellen Bewegung der sonst eigenschaftslosen Atome als letzter Ursache alles Naturgeschehens beruht.

An dem Mechanismus der Stromerzeugung ist die **Beweglichkeit der Jonen** im Elektrolyten offenbar hervorragend beteiligt, da jedes Jon die gleiche Menge Elektrizität trägt, und da von der Anzahl der an den Elektroden ankommenden Jonen, die ihre Ladung dort abgeben, die Stärke des Stromes abhängen muß. Auf diese Jonengeschwindigkeit wirken offenbar viele Umstände. Da sie auf elektrischer Abstoßung beruht, muß auf sie zunächst die Spannungsdifferenz an den Elektroden einwirken, dann die Größe der Atome, bzw. der Atomgruppen, die zu bewegen sind, und endlich der Grad der Konzentration der Lösung, durch welche die geladenen Teilchen sich einen Weg zu bahnen haben. Es würde hier zu weit führen, wenn wir alle diese Beziehungen näher verfolgen wollten. Wir beschränken uns darauf, anzuführen, daß unter allen Umständen diese Geschwindigkeit eine verhältnismäßig kleine ist und in keinem Verhältnis zu der Geschwindigkeit der Strombewegung außerhalb des Elektrolyten steht. Aus Versuchen mit verschiedenen Verdünnungen hat man die absolute Jonenbeweglichkeit bei unendlicher Verdünnung für einen Strom, der den Widerstand eines Ohm im Elektrolyten zu überwinden vermag, bei einer Temperatur von 18° in Zentimetern pro Sekunde, wie folgt, gefunden:

Kationen.				Anionen.			
Kalium	65,3	Lithium	35,5	Chlor	65,9	ClO_3	56,5
Ammonium (NH_4)	65,2	Silber	55,7	Brom	66,7	COOH	45
Natrium	44,4	Wasserstoff	318	Jod	66,7	OH	174
				NO_3	60,8		

Diese Zahlen sind mit der Temperatur ziemlich veränderlich. Es mag nun auf den ersten Blick verwundern, daß dieser Austausch der elektrischen Teilchen im Elektrolyten so langsam geschieht, denn man sollte meinen, daß in diesem Stromkreislauf überall eine gleiche Geschwindigkeit der Bewegung herrschen müsse. Aber es ist zu bedenken, daß die chemische Trennung ja schon in der Lösung vor der Stromerzeugung erfolgt ist, und daß nun beim Eintauchen der metallischen Elektrode sofort auch die Trennung der Elektrizitäten erfolgt. Den entladenen Teilchen folgen immer geladene an verschiedenen Stellen der Elektrode und speisen dadurch weiter den Strom, der sich in den metallischen Leitern mit der diesen eigentümlichen, sehr großen Geschwindigkeit verbreitet. **Die Geschwindigkeit der Jonen bedingt oder beeinflußt also nicht die Geschwindigkeit des Stromes, sondern nur seine Stärke**, in Verbindung mit den

anderen Eigenschaften der Jonen. Wir sehen auch unmittelbar, daß die Stromstärke von der Größe der Elektroden abhängen muß, welche die Jonen auffangen.

Diese absolute Beweglichkeit der Jonen kann man auch das molekulare Leitungsvermögen der betreffenden Stoffe nennen, weil diese Jonen es wirklich sind, die die Elektrizität im Elektrolyten leiten. Kohlrausch hat zuerst gefunden, daß dieses Leitungsvermögen sich bei Anwesenheit verschiedener Jonen aus der Summe der Leitungsvermögen der einzelnen Jonen zusammensetzt. Haben wir z. B. Chlorsilber als Elektrolyten, so ist sein Leitungsvermögen gleich $55{,}7 + 65{,}9 = 121{,}6$. Man bezeichnet diese wichtige Eigenschaft als das Gesetz von Kohlrausch und nennt das Verhältnis der absoluten Beweglichkeit eines der Jonen zu der Summe beider die Überführungszahl (Hittorf), die also im gegebenen Fall für Silber $55{,}7 : 121{,}6 = 0{,}46$ ist.

Nach Faradays Auffassung besteht die Elektrizität aus zwei unwägbaren Flüssigkeiten, die polare Eigenschaften haben, d. h. sich suchen und bei ihrer Verbindung neutral, wirkungslos, werden. Denken wir uns diese Flüssigkeiten wie die anderen aus Atomen zusammengesetzt, also aus den beiden sogenannten Elektronen ⊕ und ⊖, die aber gegen die chemischen Atome immer noch sehr klein sein müssen, so gibt ihre Verbindung ⊕⊖ ein masseloses Molekül, und der aus ihnen gebildete Stoff muß alle Körper durchsetzen, weil aus allen Elektrizität zu gewinnen ist. Wir sehen, daß alle diese Eigenschaften zusammen diese Elektronen identisch machen mit den Uratomen, aus denen wir uns den Weltäther zusammengesetzt denken. Die Langsamkeit der Jonenbewegung hat man durch den großen Reibungswiderstand zu erklären versucht, dem die sehr kleinen elektrischen oder Ätheratome im Lösungsmittel begegnen.

Nernst sagt hierüber: „Beachten wir, wie langsam sich ein feiner, in Wasser suspendierter Niederschlag zu Boden setzt, und wie dies um so länger dauert, je feiner der Niederschlag ist, so werden so außerordentlich kleine Partikelchen, wie es die Jonen sind, sich offenbar nur unter dem Einfluß enorm großer Kräfte im Lösungsmittel mit merkbarer Geschwindigkeit verschieben."

Uns scheint es aber, als ob diese Anschauung sich mit den übrigen Eigenschaften des Lichtäthers, der sonst alles mit der bekannten ungeheuren Geschwindigkeit durchdringt, nicht vertragen will. Wir haben im physikalischen Teile dieses Werkes eine andere Ansicht über die Entstehung der Elektrizität verfolgt, die keine besondere Flüssigkeit und auch keine besonderen Eigenschaften des Äthers voraussetzt und nur auf der Annahme einer besonderen Ordnung der Bewegungsrichtungen der Atome in den molekularen Systemen beruht. Die von vornherein aufrecht erhaltene Parallele der Molekularsysteme mit denen der planetarischen hat sich durch unsere chemischen Erfahrungen immer weiter bestärkt gefunden, und wir haben sogar gesehen, daß je nach den besonderen Gruppierungen auch besondere Drehungen des durchdringenden Lichtäthers wahrgenommen werden. Die Beziehungen dieser Richtung der Bahnbewegungen zum physikalischen, insbesondere chemisch-elektrischen Zustand der Materie stellen wir uns folgendermaßen vor:

Im amorphen Zustand herrscht keine bevorzugte Richtung weder für die Lage der Bahnebenen noch für die Bewegungen in diesen. Im kristallinischen Zustand haben sich die Bahnebenen in bestimmte Richtungen geordnet, durch die der Kristallcharakter bedingt wird, und hiermit hängen alle die anderen physikalischen Eigenschaften der Kristalle zusammen. Ohne weiteres sind aber auch in den Kristallen die Bewegungsrichtungen noch nicht geordnet: es gibt auf einem bestimmten Raum ebensoviel rechtläufige wie rückläufige Molekularsysteme, um uns wieder

astronomisch auszudrücken. Die eine Richtung beginnt erst in den optisch aktiven Kristallen vorzuherrschen. Bei der Auflösung der Elektrolyten in Wasser entsteht, wie wir sahen, eine besondere Art von Molekülen, indem sich der Elektrolyt spaltet und seine Teile sich wieder mit den Wassermolekülen verbinden. Diese beiden verschiedenen Moleküle müssen auch verschiedene Eigenschaften in Bezug auf ihre Schwerpunktslage haben, von denen ihre Drehungsrichtung abhängig werden kann. Wir erinnern in dieser Hinsicht an das asymmetrische Kohlenstoffatom.

Ferner haben wir gefunden, daß der metallische Zustand ganz besondere Struktureigenschaften hat und jedenfalls durchaus nicht als ein einfach amorpher aufgefaßt werden kann, in welchem die Moleküle ohne Ordnung durcheinander gewürfelt sind. Es ist vielmehr wahrscheinlich, daß wir es mit einem sehr verwickelten Gewebe von Kristallen und Flüssigkeit oder einem Gemisch von kristallinischer und kolloidaler Struktur zu tun haben. In den Maschen dieses Gewebes findet beim Eindringen des gelösten Elektrolyten eine Auslese der Bewegungsrichtungen statt, ein Vorgang, der im Prinzip von dem einer Durchsiebung nicht verschieden ist. Die Umlaufsbewegungen der in der elektrolytischen Flüssigkeit verschiebbaren Molekularsysteme ordnen sich um die festen Systeme des Metalles, respektive des Elektrodenmaterials entsprechend seiner Struktur und teilen dem sie durchdringenden Äther ihre Bewegungsrichtung mit, die sich längs des Metalles leitend fortpflanzt, wie es in unserm Kapitel über die Elektrizität näher erörtert worden ist. Daß solche Ätherwirbel längs der metallischen Leitungswege stattfinden, ist unzweifelhaft und durch die elektrische Anziehung und Abstoßung nachweisbar. Bei der Wirkung der Dynamomaschinen werden diese unsichtbaren Wirbel durch die sichtbare Drehung eines makroskopischen Systems von Materie erzeugt, in der galvanischen Batterie durch die der molekularen Systeme, denen eine relativ viel größere Energie zu Gebote steht als unseren gewaltigsten Maschinen. Wir haben für diese Erklärung keine neue Kraft oder keinen andern masselosen Stoff wie das Faradaysche Elektron zu Hilfe genommen, und die gegenseitigen Einwirkungen der Materie, welche die vorausgesetzte Ordnung der Bahnbewegungen hervorbringt, sind keine anderen, als wir sie allgemein in der Wissenschaft für andere chemische oder physikalische Vorgänge annehmen mußten.

Zwar bleibt immerhin noch viel zu erklären. Alle chemischen Vorgänge, insbesondere auch jene, die der galvanischen Stromerzeugung vorausgehen müssen, kommen auf solche Ordnungen der molekularen Bewegungen heraus, wenn auch bei den ausschließlich chemischen Vorgängen diese Ordnung sich auf den Bereich des Moleküls allein beschränkt, nicht auf den ganzen Materiekomplex wie bei den physikalischen Erscheinungen. Hier sind mechanische Probleme zu lösen, die weit schwieriger sind als das ungelöste Problem der drei Körper bei den himmlischen Bewegungen, denn wir haben es hier nicht nur mit einer Menge von aufeinander aus großer Nähe wirkenden, sondern auch noch mit vielgestaltigen Körpern zu tun, als welche wir die chemischen Atome erkannt haben. Endlich muß das einfache Newtonsche Anziehungsgesetz innerhalb molekularer Dimensionen sicher eine Korrektion erfahren, die prinzipiell mit der reduzierten Zustandsgleichung der Gase zu vergleichen sein wird, da hier die Raumausfüllung der stoßenden Teilchen gegenüber den gestoßenen in Betracht kommt. So lange sich die mathematische Analyse noch nicht an diese Aufgaben machen kann — und das wird noch lange auf sich warten lassen — so lange müssen wir uns mit hypothetischen Betrachtungen zufrieden geben, wie wir sie hier entwickelt haben, und die wahrscheinlichste dieser Hypothesen wird immer die sein, welche sich bekannten Tatsachen mit möglichst wenig neuen Voraussetzungen anschließt.

Dritter Teil.

Die Stufenfolge der Naturvorgänge.

1. Die Welt der Atome.

In den vorangeschickten Betrachtungen versuchten wir alle Vorgänge in der Natur auf einfache Bewegungen zurückzuführen. Wir haben uns dabei auf eine große Anzahl von Einzelheiten einlassen müssen, um die verschiedenen Erscheinungsreihen im besonderen zu verfolgen, so daß der Zusammenhang des Einzelnen mit dem Ganzen oft verloren gehen oder doch aus den Augen schwinden mußte. Im folgenden wollen wir deshalb am Schlusse dieses Werkes ein Gesamtbild aller Naturvorgänge in ihrem inneren Zusammenhang geben und die Welt, wie wir sie vor uns sehen, von dem Atom bis zu den mächtigsten Himmelskörpern, aus den einfachsten Voraussetzungen im Geist aufzubauen versuchen.

Als solche einfachste Voraussetzung hatten wir die geradlinige, gleichmäßig schnelle Bewegung von für uns unbegrenzt kleinen Körpern angenommen, die außer ihrer vollkommenen Raumausfüllung (absoluten Härte) keine Eigenschaften haben sollen, denn wir müssen ja die Eigenschaften der Materie erst erklären. Da diese kleinsten Teile, zum Unterschiede zu den zweifellos zusammengesetzten chemischen Atomen Uratome genannt, den Raum ausfüllen, muß noch eine Annahme über ihre Körperform gemacht werden. Um auch diese Annahme auf das denkbar Einfachste zu beschränken, ließen wir jede Körperform zu. Diese Uratome sind nach unseren Begriffen in unendlich großen Mengen auch in dem kleinsten noch meßbaren Raume vorhanden und bewegen sich in jeder beliebigen Richtung; ihre Gesamtwirkung kommt somit auf die von Kugeln hinaus, was sich mechanisch nachweisen läßt. Wir geben deshalb den Uratomen durchschnittlich die Kugelform, die einfachste von allen geometrischen Figuren.

Diese allerersten Axiome, von denen wir ausgingen, mochten zunächst willkürlich gewählt erscheinen. Aber auf unserm gegenwärtigen Standpunkt, nachdem wir alle Erscheinungsformen der Naturkräfte kennen gelernt haben, führt uns bei näherer Betrachtung jede einzelne Erscheinung auf diese letzten Axiome als die einzig möglichen zurück. Würden die Naturkräfte aufhören zu wirken, gleichviel, auf welche Weise wir ihre Wirkung selbst erklären, so müßte unbedingt jeder Körper seine letzte Bewegungsrichtung geradlinig und gleichmäßig fortsetzen. Nur zu dieser Bewegung bedarf es keiner besonderen Kraft mehr. Könnten wir die

Naturkräfte entfernen, so würden wir sehen, daß wir ihrer gar nicht bedürfen, da wir aus jenen übrigbleibenden Bewegungen alle Erscheinungen der Naturkräfte ableiten können.

Jenes Gesetz der Trägheit, welches zur Fortsetzung einer vorhandenen Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit zwingt, geht notwendig aus dem obersten Satz alles Geschehens hervor, daß keine Wirkung ohne Ursache sein kann. Eine einmal vorhandene Bewegung bedarf einer Ursache, d. h. einer Einwirkung von außen her, um sich in ihrer Richtung und Geschwindigkeit ändern zu können; ohne sie muß sie bestehen bleiben, wie sie ist. Wenn im Bereich der irdischen Verhältnisse ein solches Bestehenbleiben einer geradlinig gleichförmigen Bewegung nicht wahrgenommen wird, so ist dies die Folge der unausgesetzten äußeren Einwirkungen, insbesondere der Schwerkraft der Erde, die dieser Bewegung in den Weg tritt. Überhaupt wird es im ganzen Bereich der Natur nirgends ein Gebiet geben, in dem ein Körper sich ohne äußere Einwirkungen bewegen könnte, da ein ganz leerer Raum nirgends nachweisbar ist. Überall durchschwirren ihn diejenigen Materieteilchen, die wir zur Übertragung des Lichtes und der Schwerkraft notwendig voraussetzen mußten.

Die Annahme jener geradlinig gleichförmigen Bewegung ist also eine Abstraktion, ein bloßes Produkt unseres Denkvermögens, das wir indes aus den Erfahrungen insofern abzuleiten vermögen, als dieses Axiom einen Grenzzustand darstellt, dem man sich praktisch bis auf ein Bedeutendes nähern kann, und der offenbar in der Natur, wenn auch außerhalb der Erde, nahezu vorhanden ist. Der am dünnsten mit Materie angefüllte Raum ist der Weltraum. In ihm sehen wir Millionen von Weltkörpern, soweit wir es ermitteln können, sich geradlinig und gleichförmig bewegen, so lange sie nicht in die Nähe eines anderen Weltkörpers kommen, der besonderen Einfluß auf sie ausübt. Hier finden wir also unser Axiom am besten erfüllt.

Wollte man vielleicht glauben, daß es zur vollständigen Beschreibung der Naturvorgänge nötig sei, auch eine Annahme über die erste Entstehung dieser Bewegung der Uratome zu machen, so müßten wir diese Frage zurückweisen, weil sie über den Bereich unserer Erfahrungen hinausreicht. Diesen dürfen wir nicht anders verlassen, als daß wir Grenzzustände ableiten, die zu einem Ausdruck für die Gesetze des Naturgeschehens führen, die ja auch ausnahmslos Abstraktionen sind. Wir dürfen deshalb für die Welt in ihrem vollkommen unendlichen Umfang auch keinen Anfangszustand, keinen Anfang annehmen, bei dem überhaupt nur jene Uratome mit gleichförmiger, geradliniger Bewegung vorhanden gewesen wären. Vielmehr nehmen wir an, daß solche heute und zu allen Zeiten überall vorhanden waren, neben größeren, anders sich bewegenden Massen. Wollen wir aber die Eigenschaften dieser größeren Massen und verwickelteren Bewegungen aus möglichst einfachen Ursachen erklären, so müssen wir nur für unsere Zwecke zunächst alle anderen Einflüsse ausschließen und in unserm Geist eine Welt nur aus jenem erdachten Urzustand aufbauen.

Ebenso ist die Voraussetzung der vollkommenen Raumausfüllung unserer Uratome nur eine Abstraktion, die nirgends wirklich vorhanden sein wird. Wir sehen die Welt überall mit mehr oder weniger starken Verdichtungen von Materie angefüllt. Unsere physikalischen Betrachtungen haben es außer Zweifel gestellt, daß selbst der härteste Stoff aus für uns unendlich kleinen einzelnen Teilen, den chemischen Atomen oder Molekülen, bestehen muß, die miteinander nicht in Berührung sind, so daß die noch viel kleiner als die chemischen Atome angenommenen Uratome noch mehr oder weniger frei zwischen jenen hindurcheilen können. Nirgends, wo unsere groben Sinne, selbst bei künstlicher Verschärfung, die Materieteile in gegenseitiger Berührung glauben, kann solche wirklich stattfinden. Eine absolut dichte

Materieansammlung kennen wir nicht. Dagegen kennen wir Anhäufungen von Materie in allen sonstigen Abstufungen der Dichtigkeit und Größe. Von den Uratomen an, von denen wir nur sagen können, daß sie noch wesentlich kleiner als die chemischen Atome sein müssen, deren Größe wir unter gewissen Voraussetzungen theoretisch noch zu ermitteln vermögen, bis zu den ungeheuern Sonnenschwärmen der Milchstraßensysteme, die ganz ebenso ein physikalisches Ganze bilden, wie eine Handvoll zusammenhängender Sandkörner, baut sich die Welt der Materie in ungezählten Stufenfolgen auf. Weshalb sollten jene Materieteilchen, die wir Uratome nannten, die wirklich unterste Grenze der Materieverteilung bilden? Wir müssen sie derzeit als solche annehmen, weil unsere Untersuchungen zunächst noch nicht weiter reichen. Aber auch sie mögen noch teilbar, mögen sogar als Sonnenschwärme in *ihrer* Stufe der Naturentfaltung gelten, die sich stets noch nach der Tiefe oder nach der Höhe hin als grenzenlos erwiesen hat. Wir aber müssen die Abstraktion der *Unteilbarkeit und absoluten Härte* dieser Uratome machen, um wieder einen Grenzzustand in unserem Geiste zu schaffen, von dem wir ausgehen können.

In ähnlicher Weise ist unsere Annahme über die *Körperform der Atome* eine Abstraktion. Sind auch diese, wie oben angedeutet, Ansammlungen noch kleinerer Materieteilchen, so würde ihre Kugelform durch dieselben Umstände zu erklären sein, wie ungefähr die Kugelform der Wassertropfen und der Himmelskörper. Gehen wir also von Tatsachen der Beobachtung aus, so erkennen wir auch hier wieder unsere Annahme der Kugelform als einen abstrakten Grenzzustand.

Wir denken uns also, um die Welt, wie sie ist, aus jenen Abstraktionen aufzubauen, einen *völlig leeren Raum*, groß genug, um in ihm diese Welt, soweit wir sie kennen, zu erzeugen, und erfüllen ihn mit einer genügenden Menge *kugelförmiger, raumausfüllender, gleichförmig geradlinig mit allen denkbaren Geschwindigkeiten und in allen Richtungen bewegter, sonst eigenschaftsloser Uratome.* Der Raum soll von außerhalb keinerlei Einwirkungen erfahren.

Schon nach einer unmeßbar kurzen Zeit wird sich der angenommene, nur gedachte, niemals vorhanden gewesene Zustand jenes Raumes verändert haben, indem gewisse Uratome, auch wenn keines sich vorher von dem anderen unterschieden hatte, andere Eigenschaften als die große übrige Menge erhalten. Da nämlich unsere Uratome raumausfüllend sind, so müssen sich die Wege einiger derselben derart kreuzen, daß *Zusammenstöße* zwischen ihnen stattfinden. Diese Stöße können je nach der Richtung, in welcher sie erfolgen, sehr verschiedene Wirkungen haben. Am häufigsten werden die nicht zentralen und schiefwinkeligen Stöße sein. Diese bewirken wegen der absoluten Härte der kugelförmigen Uratome, wie Versuche unter nahezu entsprechenden Verhältnissen zeigen, daß beide Kugeln unter einem bestimmten andern Winkel mit verminderter Geschwindigkeit eine *gleichförmig geradlinige Bewegung* fortsetzen, sich gleichzeitig aber *um eine Achse drehen*, und zwar die eine Kugel in *entgegengesetzter Richtung* wie die andere. Auch diese rotierende Bewegung bleibt bis auf einen neuen Eingriff unveränderlich bestehen.

Wir sehen, wie wesentlich verschieden diese neue Art von Uratomen gegenüber den ursprünglichen ist. Sie unterscheiden sich durch ihre Rotation und ihre Geschwindigkeit dauernd von jenen. Wie wir erfahren haben, lassen sich alle *elektrischen und magnetischen Erscheinungen auf derartige Rotationen der kleinsten Materieteilchen zurückführen*, die durch besondere Umstände in besonderer Weise geordnet werden. Die beiden nach Faraday angenommenen elektrischen Flüssigkeiten sind hier in der Materie von vornherein als vorhanden

zu denken, aber überall in gleicher Menge und ohne weitere Einwirkung, so daß sie ihre Wirkung gegenseitig aufheben. Diese Bedingung wird durch die Rotation der zusammengestoßenen Uratome erfüllt, von denen notwendig immer je zwei in entgegengesetzter Richtung umschwingen müssen. Wenn wir also die Wirkung der einen Rotationsrichtung als die der positiven, die andere als die der negativen Elektrizität auffassen, so bleibt zwar der ganze Materiekomplex elektrisch neutral, gewinnt aber durch die erfolgten Zusammenstöße die Möglichkeit einer Spaltung der Elektrizitäten in um so höherem Maße, je mehr dieser Stöße stattgefunden haben.

Alle Materie, die wir daraufhin prüfen können, nimmt teil an einer rotierenden Bewegung, die, durch verschiedene Einwirkungen in verschiedene Bahnrichtungen gelenkt, zur langgestreckt elliptischen oder auch nahezu geradlinig pendelnden Bewegung werden kann. Unsere Untersuchungen über die Ursachen der Wärme haben jeden Zweifel genommen, daß solche Umlaufsbewegungen auch in molekularen Dimensionen stattfinden müssen, wie wir anderseits jeden Himmelskörper, der sich auf seine Rotation untersuchen läßt, um seine Achse schwingen sehen. Die Rotation ist die allgemeinste Bewegungserscheinung außer der geradlinig fortschreitenden, wie es unsere Voraussetzungen nötig machen. Denn ebenso wie jene Uratome bewegen sich auch die Himmelskörper zunächst geradlinig durch den Raum und müssen ebenso wie die Atome gelegentlich aufeinanderstoßen. Im übrigen kennen wir auch noch andere Ursachen, durch welche die Achsendrehung der Himmelskörper wohl in den meisten Fällen entstanden ist.

Zuweilen wird der Zusammenstoß der Uratome nahezu zentral oder so stattfinden, daß die beiden Körper nicht mehr aneinander vorübereilen können, sondern zusammenhängend ihren Weg fortsetzen. Man kann nach dem Gesetz des Parallelogramms der Kräfte alle möglichen Fälle bestimmen, in denen je zwei solcher Atome zusammenbleiben. Diese bilden dann bereits ein zweiatomiges Molekül, wenn auch nicht in dem aus unseren physikalischen und chemischen Erfahrungen abgeleiteten Sinne. Diese Moleküle gehören noch einer tiefer liegenden Stufe an, so daß eine sehr große Anzahl erst das leichteste chemische Atom, das des Wasserstoffes, bildet. Aber eine erste, von der Kugel abweichende Form der Materieausfüllung ist hierdurch gegeben; dieser Vorgang ist deshalb so bedeutsam, weil die kristallinischen Eigenschaften der Stoffe, mit denen eine ganze Reihe von physikalischen Eigenschaften zusammenhängen, durch die Art der Spaltbarkeit der Materie, also in letzter Linie durch die Zusammenlagerung ihrer kleinsten Teile bedingt ist.

Wir sehen somit bereits kristallinische Eigenschaften der Materie sich herausbilden. Soll ein Raum durch Kugeln ausgefüllt werden, die sich berühren, so müssen zwischen den Kugeln Lücken bleiben. Aber eine einzelne Kugel nimmt mit diesen Lücken den Raum eines Würfels in Anspruch, wenn die Verbindungslinien der Mittelpunkte jener zusammengelagerten Kugeln alle im rechten Winkel zueinander stehen. Wir haben dann eine der regulären Kristallformen vor uns. Es gibt aber auch andere Lagerungen. So kann sich an zwei Kugeln eine dritte so lagern, daß die Verbindungslinien der Mittelpunkte ein Dreieck bilden, und dann eine vierte so auf dieses körperliche Dreieck legen, daß die Umgrenzung aller vier Kugeln ein Tetraeder wird, während durch andere Angruppierung der vierten Kugel ein Rhomboeder entsteht.

Es können auf diese Art aus Kugeln alle regulären Kristallformen hervorgebracht werden, aber auch nur diese. Formen von Kristallen, bei denen die Achsen nicht alle gleichlang sind oder gegeneinander geneigt stehen, lassen sich durch Zusammenlagerung von Kugeln nicht

darstellen. Wir haben bei unseren chemischen Betrachtungen gesehen (S. 547), daß, je einfacher die Stoffe zusammengesetzt sind, sie desto mehr in regulären Formen auskristallisieren. Die sogenannten chemischen Elemente kristallisieren mit nur zwei Ausnahmen in regulären und hexagonalen Formen, die man in unserm Sinne zu den regulären Formen zählen muß, weil sie sich durch Kugeln herstellen lassen. Wir sehen so die Elemente der Kristallformen sich aus unseren Axiomen von selbst bilden.

Je mehr der Uratome sich zu einem zusammenhängenden Körper vereinigt haben, desto leichter ist er von anderen Atomen oder bereits größeren Vereinigungen derselben zu treffen, und desto mehr wird er sich also weiter vergrößern. Da dieser Zuwachs von allen Seiten gleichmäßig geschehen muß, weil keine Bewegungsrichtung der Uratome zunächst vorherrschen soll, so müssen auch diese größeren Vereinigungen wieder Kugelform annehmen. Wir erhalten jetzt schon Atome einer höheren Entwickelungsstufe, die wir etwa als die uns in ihren Wirkungen bekannten physikalischen, bez. chemischen Atome ansprechen können. In ihnen sind die Uratome in unmittelbarer Berührung miteinander, soweit dies ihre Körperform gestattet. Auch diese physikalischen Atome haben also noch nahezu eine maximale Härte, und man wird sie durch keine uns zur Verfügung stehenden Mittel teilen oder zusammenpressen können.

Diese Atome werden nun innerhalb des sie allseitig umgebenden Hagels der viel kleineren Uratome merkwürdige Eigenschaften zeigen. Sie bilden dadurch, daß sie Uratome von allen Seiten aufnehmen, oder daß diese seitlich aufstoßen und reflektiert werden, um sich eine Sphäre, in der sich eine kleinere Anzahl Uratome vermischt mit reflektierten Atomen befinden, die durch den Zusammenstoß eine geringere als die durchschnittliche Geschwindigkeit haben. Dies muß nach rein mechanischen Prinzipien, wie wir schon auf S. 104 u. f. zeigten, nach einer Gesetzmäßigkeit stattfinden, die genau dem Gravitationsgesetz entspricht. Durch ihre bloße Raumausfüllung innerhalb der sie rings umschwirrenden Uratome bilden also diese größeren Körper Anziehungssphären, die einen zweiten in diese Sphäre eindringenden Körper zwingen, sich dem andern mit zunehmender Geschwindigkeit zu nähern. Der genaue Ausdruck der Gravitationsgesetze, wie wir ihn aus der Beobachtung der Himmelskörper abgeleitet haben, kann indes, wie wir S. 529 andeuteten, innerhalb dieser atomistischen Stufe der Naturentfaltung noch nicht gelten; er muß einer Korrektion so lange unterliegen, als die Größe der Uratome gegen die anziehenden und angezogenen Massen noch nicht vernachlässigt werden kann. Aus diesem Grund ist es noch nicht gelungen, die molekularen Bewegungen in völligen Einklang mit den himmlischen Bewegungen zu bringen. Aber alles spricht dafür, daß in der Tat ganz ähnliche Gesetzmäßigkeiten in dieser untersten unserer Forschung noch zugänglichen Stufe herrschen, wie in jener obersten der Himmelskörper.

Sobald nun die Schwerkraft eine Rolle zu spielen beginnt, entstehen molekulare Weltsysteme, in denen Massenansammlungen umeinander in Kegelschnitten kreisen. Es vereinigen sich zwei oder mehrere sonst selbständige Massen zu einem gemeinsam geradlinig den Raum weiter durcheilenden Ganzen, während diese nur durch die Anziehungskraft zusammengehaltenen Massen sich nicht mehr berühren. Wir haben die eigentlichen physikalischen Moleküle vor uns, deren fortschreitende Bewegung wir als ihre kinetische Energie, unter Umständen auch als ihre Temperatur bezeichneten, während wir ihre Bahnbewegung die potentielle Energie, latente Arbeit oder latente Wärme nannten.

Unsere Erfahrungen mit dem Licht, der Elektrizität u. s. w., haben bewiesen, daß die ursprünglichen Bewegungen der Uratome, die wir auch Ätheratome genannt haben, sich nach

Hunderttausenden von Kilometern in der Sekunde bemessen. Je mehr dieser Uratome sich zu größeren Massen vereinigen, desto mehr muß sich durch die Zusammenstöße auch diese Geschwindigkeit vermindern. Wir kommen also zu dem durch die Beobachtung im allgemeinen bestätigten Schluß, daß die fortschreitende Bewegung mit der Größe der Körper abnimmt. Die Untersuchungen der kinetischen Gastheorie (S. 116) ergaben, daß die Geschwindigkeiten der Gasteilchen mit zunehmenden Atomgewichten abnehmen; aber sie bemessen sich immer noch nach Kilometern in der Sekunde.

Da die kreisende Bewegung der Atome in den Molekülen aus der fortschreitenden entstanden ist, indem diese nur durch die Anziehungskraft abgelenkt wurde, so müssen ihre Bahngeschwindigkeiten gleichfalls sehr große sein, und es ist anzunehmen, daß sie ihre Umläufe viele Millionenmal in einer Sekunde vollführen. Durch diese Umschwungskraft wird es uns fast unmöglich gemacht, durch rein mechanische Mittel in diese Bahnkreise einzudringen. Ein Molekül ist noch beinahe ebenso wie ein Atom als ein Ganzes zu betrachten, das den Raum der Bahnumfänge seiner Atome auszufüllen scheint.

Haben sich an einer Stelle des Raumes eine größere Zahl solcher Moleküle zusammengefunden, die aber immer noch durch so große Zwischenräume getrennt sein mögen, daß sie etwa einer leichten Wolke vergleichbar sind, so werden wohl die meisten Uratome sie durcheilen, ohne auf Moleküle zu stoßen. Von den wirklich erfolgenden Zusammenstößen von Uratomen mit Molekülen der Wolke aber müssen notwendig mehr von außen nach innen ihre Wirkung ausüben als umgekehrt, weil diejenigen Uratome, welche auf ein Molekül vom Inneren der Wolke her, durch einen Stoß nach außen, wirken sollen, die Wolke vorher zum größeren Teile durchflogen haben müssen; das werden aber eben wegen der bereits auf dem Weg erfolgten Zusammenstöße weniger sein, als von der gegen den Weltraum hin freien Seite kommen: die Wolke schützt ihre Materieteilchen gegen Stöße von innen, d. h. die Teilchen werden gegen ihre Mitte hin getrieben, und die Wolke verschiebt ihre Moleküle im Sinn einer allmählichen Verdichtung gegeneinander. Es beginnt die bei allen sich selbst überlassenen Materieansammlungen wahrgenommene Verdichtungsarbeit, die die Himmelskörper geschaffen hat. Wir sehen ohne weiteres, daß hierdurch wieder aus Molekülen, die einen beliebigen mittleren Abstand voneinander behalten können, Kugeln gebildet werden müssen. Denn würde eine solche Wolke z. B. zuerst eine langgestreckte Gestalt haben, so müßten aus der Richtung des längeren Durchmessers mehr Stöße aufgefangen werden als von anderen Richtungen. Der Überschuß der Stöße von außen her gegen die von innen ist also auf der Oberfläche einer Wolke in der Richtung ihres größeren Durchmessers größer als in der des kleineren Durchmessers, und die Stöße müssen in der ersteren Richtung kräftiger nach innen getrieben werden.

So entsteht die Umgrenzung eines Körpers, der doch aus ganz getrennten Einzelsystemen von Molekülen zusammengesetzt ist. Diejenigen Moleküle, welche in ihrer fortschreitenden Bewegung nach außen streben, werden von den Uratomen zum Teil wieder zurückgetrieben, zum anderen Teil aber werden sie in den Raum frei hinauseilen: jeder Körper, auch der festeste, verflüchtigt sich zum Teil an seiner Oberfläche. Nach innen wird die Bewegung der Moleküle einen Widerstand an benachbarten Molekülen finden, auf die sie stoßen, und so im Inneren der Wolke einen Zickzackweg ausführen, ähnlich wie ihn die Gasgesetze bei eingeschlossenen Gasen voraussetzen. Wir haben gesehen, wie sich alle Äußerungen der Temperatur bei Körpern, die sich frei ausdehnen können, bei denen also von außen her kein Einfluß

auf die innermolekularen Bewegungen geübt wird, sich allein durch die Zahl solcher Stöße und der Geschwindigkeit, mit der sie erfolgen, erklären lassen. Die fortschreitende Geschwindigkeit der Moleküle bedingt die absolute Temperatur, deren Wirkung durch die Anzahl der mit dieser Geschwindigkeit aufeinander oder ihre sonstige Umgebung stoßenden Materieteile, also mit der Dichte verändert wird. Schließen wir eine bestimmte Menge von Molekülen in einem engeren Raum ein als zuvor, so erfolgen um so mehr Stöße, und die Temperatur muß entsprechend steigen. Dasselbe muß geschehen, wenn wir der Zahl von Molekülen in jenem Raum eine größere Geschwindigkeit geben, weil sich auch dadurch die Anzahl der Stöße in dem Raume vermehrt. Wir haben das Mariottesche Gesetz vor uns. Wie aus unseren Voraussetzungen auch die van der Waalsche Verbesserung dieses Gesetzes mit Notwendigkeit folgt, haben wir auf S. 529 näher erörtert.

Alle Wirkungen der Temperatur sind auf Ausdehnung und Zusammenziehung des Stoffes zurückzuführen, auch die Übergänge in die verschiedenen Aggregatzustände und die chemischen Wirkungen der Wärme. Diese ausdehnende Kraft ist aber durch jene Stöße unmittelbar verständlich gemacht, die die umgebenden Wände um so mehr auseinander zu treiben suchen, je häufiger und je kräftiger sie sind.

Es bleibt indes noch die Wärmeübertragung von einem wärmeren zu einem kälteren Körper zu erklären. Vermischen wir die beiden verschieden warmen Körper miteinander, so ist der Temperaturausgleich unmittelbar verständlich. Durch die Zusammenstöße der verschieden schnell sich bewegenden Moleküle muß notwendig ein Ausgleich ihrer Geschwindigkeit eintreten; die schnelleren beschleunigen beim Zusammenstoß die langsameren und verlieren dadurch selbst an Geschwindigkeit. Auch bei bloßer Flächenberührung der beiden verschieden warmen Körper muß dieser Ausgleich durch Wärmeleitung erfolgen, wenn auch entsprechend langsamer. Wir wissen ja, daß selbst in festen Körpern die Moleküle noch einen Spielraum zwischen sich lassen, eben um ihre Temperaturbewegungen ausführen zu können. Wenn hier auch nur an der Berührungsfläche die wärmeren mit den kälteren, also die schnelleren mit den langsameren Molekülen zusammenstoßen, so müssen doch die äußeren Moleküle der nächsten Schicht ihre veränderte Geschwindigkeit mitteilen, und der Ausgleich schreitet auch so von Schicht zu Schicht fort mit einer Geschwindigkeit, die von der besonderen Art der Materie, das heißt der besonderen Form ihrer kleinsten Teile, und ihrer Dichte abhängt: die Wärmeleitungsgeschwindigkeit ist verschieden.

Nun überträgt aber ein wärmerer Körper seinen Wärmeüberschuß auf einen kälteren auch durch den sogenannten leeren Raum hindurch, der nur von unseren Uratomen durchkreuzt wird. Dies kann nur durch Vermittelung der Uratome, des sogenannten Äthers, geschehen. Vergegenwärtigen wir uns, daß in einer umgrenzten Materieansammlung irgendwelcher Art die Moleküle in bestimmten, durch ihre Temperatur bedingten Grenzen hin und her schwirren. In den Gasen geschieht dies in Zickzacklinien, die auch dort in einer bestimmten Periode in ähnlicher Weise wiederkehren müssen, weil ja die Moleküle dauernd in der „Wolke" bleiben, so daß auch hier wie sicher in den festeren Aggregatzuständen gewisse Bahnbewegungen stattfinden, die von der Temperatur der betreffenden Masse abhängig sind. Diese Moleküle werden von den aus dem Weltraum kommenden Uratomen teilweise getroffen und von ihnen zurückgeworfen, wodurch deren Bewegung etwas von der Bewegung der Moleküle annehmen und eine deren Temperatur entsprechende Eigenschaft erhalten muß, die wir uns in folgender Weise vorstellen:

Die Temperaturbewegung der Moleküle im großen und ganzen wird als eine pendelnde angenommen. Trifft ein Uratom mit einem Molekül zusammen, das gerade nach außen schwingt, so wird ihm vom letzteren ein Kraftzuschuß mitgeteilt, und es bewegt sich, von dem Molekül zurückgeworfen, schneller als der Durchschnitt. Trifft aber ein nächstes Uratom auf das nun in seiner Periode nach innen pendelnde Molekül, so muß es mit einer geringeren Geschwindigkeit als der Durchschnitt zurückfliegen. Die reflektierten Uratome, die wir schon früher eine Sphäre von besonderen Wirkungen um eine Materieansammlung bilden sahen (Schwerkraft), werden also periodisch mit geringerer und größerer Geschwindigkeit durch diese Sphäre eilen, und diese Periode wird von der Temperatur des reflektierenden Körpers abhängen. Bringen wir die durchschnittlich fortschreitende Bewegung dieser Uratome, durch welche die Schwerkraft bedingt wird, in Abzug, so bleibt eine hin und her schwingende Bewegung der Uratome übrig, eine Wellenbewegung, wie sie der sogenannte Äther als Lichtschwingungen ausführt, von denen wieder die der strahlenden Wärme nur quantitativ verschieden sind. Treffen die in jenen bestimmten Perioden schwingenden Uratome auf einen anderen Körper, dessen Moleküle in anderen Perioden schwingen, der also eine andere Temperatur hat als derjenige, von dem die Uratome ausstrahlten, so werden sie ihm diese Temperatur mitzuteilen suchen, wenn ihre Energie größer ist, und in jedem Falle wird der Temperaturausgleich durch diesen Strahlungsvorgang nach Maßgabe von Gesetzen stattfinden, die aus unseren Voraussetzungen theoretisch abzuleiten sind und mit der Beobachtung in Einklang stehen.

Es ist von vornherein einzusehen, daß die mit den betreffenden Temperaturänderungen gleichbedeutenden Bewegungsänderungen der Moleküle als selbständige Systeme nicht ohne Einfluß auf die Zustände in den molekularen Systemen sein können. Sie werden um so deutlicher hervortreten, je größer entweder die Dichtigkeit der betreffenden Materie oder je höher ihre Temperatur wird; denn um so häufiger werden Zusammenstöße stattfinden, die, wegen des geringer werdenden Spielraumes für die schwingenden Bewegungen der Moleküle oder wegen ihrer zu großen Kraft, auch auf die Bewegung der Atome in den Molekülen wirken. Innerhalb der Grenzen physikalischer Erscheinungen nahmen wir diese Wirkung entweder als frei oder als latent werdende Arbeit oder als Wärme wahr. Die für uns unter gewöhnlichen Umständen nicht in Erscheinung tretende Energie der inneren Bahnbewegungen der Atome in den Molekülen gibt etwas an die freie Energie der fortschreitenden Bewegung ab oder nimmt von ihr auf: es wird Wärme oder Arbeit in irgend einer Form frei oder gebunden.

In das Gebiet der chemischen Vorgänge spielen schon die Übergänge in die verschiedenen Aggregatzustände hinüber, die eine Folge der Temperaturänderungen sind. Sahen wir in den Gasen die Moleküle noch voneinander unabhängig in Zickzacklinien umherschwirren, ohne daß das eine vom anderen anders als durch seine Zusammenstöße beeinflußt wurde, so treten beim Übergang in den flüssigen Zustand die Moleküle zu ähnlichen Systemen zusammen, wie wir im Gaszustand die Atome im Molekül verbunden sahen. Die Anziehungskraft beginnt von Molekül zu Molekül zu wirken. Die Erscheinungen des osmotischen Druckes, die nach van't Hoff aus den Gasgesetzen abgeleitet werden können (S. 534), machen es in Verbindung mit chemischen Erfahrungen sehr wahrscheinlich, daß sich die Moleküle der Flüssigkeiten aus einer bestimmten, für jeden Stoff wechselnden Zahl seiner Gasmoleküle zusammensetzen. Es entstehen also wieder größere Materiesysteme bei weiter abnehmender Geschwindigkeit

der geradlinig gleichförmigen Bewegung, die auch in den Flüssigkeiten wegen des osmotischen Druckes noch stattfindet.

Diese Materiesysteme sind nun schon in allen wesentlichen Punkten in Bezug auf ihre Bewegungsverhältnisse mit jenen himmlischen Materiesystemen zu vergleichen, für welche alle Konsequenzen der Gravitationsgesetze auf das genaueste studiert worden sind. Wir können die Mechanik des Himmels auf die der molekularen Bewegungen anwenden, und sie erweist sich in all ihrer bewundernswerten Vollkommenheit noch nicht ausgebildet genug, um die oft viel verwickelteren Verhältnisse der molekularen Bewegungen zu erklären. Es handelt sich ja hier meist um die Anwendung des noch ungelösten Problems der drei Körper, das bei den Himmelskörpern Anwendung finden kann, weil sie im Verhältnis zu ihren Massen ungleich weiter voneinander entfernt sind. Bei den molekularen Verhältnissen ist dies nicht mehr möglich.

Am Himmel sehen wir die planetarischen Systeme, mit denen wir die der Moleküle in unserem Sinne zu vergleichen haben, sich derart ordnen, daß die Planeten alle in ein und derselben Richtung ihren gemeinsamen Schwerpunkt in Bahnebenen umkreisen, die sich in verhältnismäßig engen Grenzen um eine feste Ebene gruppieren. Dies ist nicht nur eine Folge ihrer Entstehung, etwa nach der Kant-Laplaceschen Idee, sondern eine aus den Gravitationsgesetzen folgende Notwendigkeit, die sich im Laufe der Zeit durch die gegenseitigen Einwirkungen der einzelnen Glieder aufeinander herausstellen muß. Selbst die von den Grenzen des Sonnensystems eindringenden Kometen müssen ihre Bahnebenen allmählich in die Nähe der Grundebene der Planeten legen, wenn sie als periodische Kometen im System festgehalten werden. Umgrenzen wir nun den Raum, bis zu dem die Planeten in ihrer kreisenden Bewegung noch gelangen können, allerseits durch Flächen, so entsteht ein linsenförmig abgeplatteter Körper, und einen solchen würde auch nach unseren vorhergehenden Betrachtungen ein ähnlich aufgebautes Molekül einnehmen.

Wir haben also abgeplattete Materieansammlungen vor uns, die in der Weise, wie wir es für die kugelförmigen ausgeführt haben, aneinander geschichtet, geometrische Körper mit ungleich langen und geneigten Achsen, irreguläre Kristalle, bilden müssen. Würden sich eine größere Anzahl von Systemen, die alle den gleichen Aufbau wie unser Sonnensystem haben, einander so weit nähern, daß sie zwar eine gegenseitige Wirkung aufeinander üben, aber dadurch noch nicht auseinander gerissen werden, so läßt sich übersehen, wenn auch der strenge mathematische Beweis noch nicht durchzuführen ist, daß alle diese Systeme ihre Bahnebenen in eine gleiche Richtung zu bringen trachten und sich gleichzeitig so ordnen, daß sie bei geringster Raumausfüllung sich am wenigsten stören. Das wird wieder dadurch erreicht, daß jene, den Umfang des Systems umgrenzenden Linsenkörper sich mit ihren Flächen höchstens berühren, niemals durchschneiden. Das heißt, es findet eine Aneinanderlagerung statt wie bei linsenförmigen festen Körpern. Geben wir diesen schließlich drei Achsen, machen wir sie also zu Ellipsoiden, wie sie durch sehr elliptische Bahnen (z. B. bei den Doppelsternen) entstehen, so bilden sich durch ihre Aneinanderlagerung die Kristalle mit drei verschiedenen Achsen, die alle zueinander geneigt sind.

Im flüssigen Zustand gibt sich eine kristallinische Struktur der Materie noch wenig zu erkennen. Die einzelnen molekularen Systeme haben sich noch nicht ihrer Form entsprechend gelagert, weil wegen ihres noch verhältnismäßig großen Abstandes ihr Einfluß aufeinander noch nicht groß genug ist. Aber gewisse optische Eigenschaften verraten auch schon bei den Flüssigkeiten die besondere Form ihrer Moleküle. Wir wissen, daß z. B. alle flüssigen

Stoffe, in denen sogenannte asymmetrische Kohlenstoffatome vorkommen, die Polarisationsebene des Lichtes drehen, wie es sonst nur gewisse Kristalle tun. Das Licht verrät uns aber die Bewegungsformen der molekularen Systeme, die es durchdringt. Seine Wellenflächen (S. 564) müssen ein treues Abbild jener Umhüllungsflächen der molekularen Systeme sein, die wir vorhin gebildet hatten. Die einfache und Doppelbrechung des Lichtes sowie seine Polarisation sind mathematisch zu konstruierende Folgen dieser Formen und Beziehungen.

Sobald aber die molekularen Systeme sich einander so weit genähert haben, daß ihre Begrenzungssphären sich nahezu berühren, ordnen sie sich alle so, daß sie einen möglichst kleinen Raum einnehmen; sie müssen zu Kristallen zusammenschießen. Wie klein jener Raum ist, der zwischen den molekularen Systemen bleibt, hängt von dem Bau und den Bahnumfängen der einzelnen Glieder ab, insbesondere also von der Temperatur.

Bei den chemisch gleichen Stoffen, die demnach in denselben Formen kristallisieren, haben wir eine ganz gleiche Zusammensetzung der molekularen Systeme, also dieselbe Form und Zahl der Atome vorauszusetzen, wie sie immer entstehen müssen, wenn gleiche Ursachen dabei mitwirken. Jeder chemische Stoff entsteht aber nur unter völlig gleichen Bedingungen oder ist immer nur aus Verbindungen zu erhalten, die er vorher eingegangen ist, in denen sich also jene gleichartigen Systeme an andere unter sich wieder gleichartige gebunden hatten und wieder getrennt werden. Auch am Himmel bemerkt man vielfach Ansammlungen von Materie, die aus gleich großen und auch physisch gleichen Sternen zu bestehen scheinen. Wenn irgendwo die Urmaterie, d. h. in unserem Sinne die Ansammlung von Uratomen, gleichmäßig verteilt war, so konnten sich auch nur Körper derselben Art bilden, seien dies nun Atome, Moleküle, Kristalle, Weltkörper, Planeten- oder Milchstraßensysteme. In den meisten Fällen zwar sind die Sonnen in den Sternhaufen sehr verschieden groß und unregelmäßig verteilt, wie wir auch in der irdischen Natur kaum irgendwo einen chemischen Stoff rein antreffen und meistens die verschiedenartigsten Stoffe durcheinander gewürfelt finden. Erst die Kunst des Menschen verstand es, die gleichartigen Stoffe zu sondern. Er ordnete die Materie in kleinen Mengen zu molekularen Sternhaufen von gleicher Konstitution.

Wie es am Himmel die allerverschiedensten zu Systemen vereinigten Materieansammlungen gibt, von den einfachen Doppelsternen bis zu den zusammengehörigen Systemen von Sonnen, die gewiß zum großen Teil ebenso wie die unserige von Planeten, und diese wieder von Monden, umkreist werden und ihrerseits sich wieder zu einem ungeheuern Ringe zusammenschließen, der als Milchstraße zu uns herüberdämmert, so gibt es auch alle erdenklichen Systemverbindungen in der molekularen Stufe der Materieentwickelung, vom Wasserstoffatom bis zu den Eiweißmolekülen, die aus Hunderten von Atomen bestehen und in ihrem kolloidalen Zustand sich tausendweise wieder zu einer höheren Vereinigung zusammentun, bis sie schließlich die Kristalle bilden, bei denen diese unsichtbare Welt der Moleküle in die greifbare hineinwächst.

Jede chemische Verbindung ist also ein molekulares Materiesystem von ganz bestimmter Größe und ganz bestimmter Anordnung seiner Glieder, worüber die chemische Wissenschaft in vieler Hinsicht schon genauere Aufschlüsse zu geben vermag. Wir haben näher auseinandergesetzt, wie die chemischen Strukturformeln eine schematische Abbildung dieser Systeme sind und nicht nur über Zahl und Maße der einzelnen Glieder, Atome, sondern auch über deren Anordnung Kunde geben. Würden die physikalischen Untersuchungen

gleich genau anzugeben verstehen, welche Bahnbewegungen diese Glieder in ihren Systemen ausführen, und welches die Dimensionen dieser Bahnen in Bezug auf die Größe der einzelnen Glieder sind, so würde man eine mathematische Theorie dieser Bewegungen und der gegenseitigen Einwirkungen der verschiedenen Systeme auf Grund der Gravitationsgesetze ausarbeiten können, die mit den chemischen Erfahrungen in Einklang sein muß, wenn unsere Voraussetzungen richtige waren. Man hat in dieser Hinsicht Versuche gemacht, die wenigstens zu keinen Widersprüchen führten; aber eine eigentliche theoretische Chemie auf mechanischer Grundlage wird noch lange nicht entwickelt werden können. Für die unerschöpfliche Fülle von chemischen Erscheinungen müssen wir uns fast ausschließlich an die Tatsachen der Erfahrung halten und aus diesen noch immer mehr Eigenschaften des Baues dieser Systeme abzuleiten suchen.

Hier wird namentlich der neue Zweig der Stereochemie die wichtigsten Dienste leisten, der z. B., wie wir S. 517 ausführten, zu der Erkenntnis der tetraedrischen Form des Kohlenstoffatoms führte. Diese Stereochemie verschafft uns auch zuerst auf mechanischen Prinzipien beruhende Vermutungen über das Wesen der chemischen Wertigkeit (S. 514). Die chemischen Atome haben offenbar keine Kugelform. Ebenso wie wir in der tieferen Stufe der Materievereinigung, als erst wenige Uratome zusammengetreten waren, zunächst andere als Kugelformen entstehen sahen, eben jene Formen, die die geometrischen Elemente in den Kristallen bilden mußten, so bilden sich auch in der molekularen Stufe solche Formen aus größeren kugelförmigen Ansammlungen. Selbst in der Stufe der Weltkörper findet noch ähnliches statt. Wir kennen Doppelsternsysteme, in denen die beiden Sterne einander in so geringen Entfernungen umkreisen, daß sie in diesem Sinne den Doppelatomen der chemischen Elemente durchaus gleichen, denn auch diese können sich nicht völlig berühren. Mehrfache derartige Systeme mit einander sehr nahen Komponenten sind allerdings noch nicht entdeckt worden, was indes seinen Grund sehr wohl in der Schwierigkeit des betreffenden Nachweises haben kann.

Die chemische Wertigkeit haben wir als eine Flächeneigenschaft der betreffenden Atome angesehen. Das vierflächige und zugleich vierwertige Kohlenstoffatom bildete den Ausgangspunkt dieser hypothetischen Betrachtungen. Da indes die chemischen Atome sich nicht unmittelbar aneinanderlagern, sondern innerhalb der Grenzen ihrer Moleküle kreisende Bewegungen ausführen, so sind durch unsere letzten Erwägungen jene Flächen zu bloßen Tangentialflächen geworden, welche den molekularen Raum (S. 591), nicht mehr die eigentliche Körpergestalt umgrenzen.

Dadurch tritt nun unsere Ansicht von der Wertigkeit in ein ganz anderes Licht. Alle einwertigen Elemente haben wir, abgesehen von den eigentümlichen neuen Gasen, die man in der Atmosphäre entdeckt hat, und die sich als einwertig auch in dem Gaszustand herausgestellt haben (S. 449), als Doppelkörper zu betrachten, deren einzelne Atome einander umkreisen wie die Doppelsterne. Der Chemiker sagt, ihre einwertigen Valenzen sättigen sich. Durch stärkere Systeme können diese Doppelkörper auseinandergerissen und je einer von ihnen mit je einem der anderen Systeme vereinigt werden, indem die einwertigen Atome etwa als Trabanten ein anderes stärkeres Atom umkreisen, und es können soviel einzelne, d. h. einwertige Körper in das neue System aufgenommen werden, als dieses aufnahmefähige Atome hat. Wie solche Systeme aufgebaut sein müssen, läßt sich derzeit weder theoretisch noch praktisch auf Grundlage der Gravitationsgesetze bestimmen, aber auch hier lassen sich astronomische Parallelen ziehen. Alle chemischen Systeme sind in der Regel gesättigt. Ebenso könnte in

unserem Sonnensystem kein Eindringling von einer mit den Planeten vergleichbaren Größe Platz finden, ohne daß ein völliger Umbau stattfinden müßte. Die Abstände der Planeten gehorchen einer bestimmten Regel; es gibt keine Lücke im System, es ist chemisch gesättigt. Denken wir uns einen planetarischen Doppelkörper ungefähr von der Größe der Jupitertrabanten, dessen einzelne Teile einander in einem Abstand umkreisen, der einen beträchtlichen Bruchteil der Bahnabstände zweier Planeten ausmacht, zwischen die Bahnen von Jupiter und Saturn geraten, so werden die beiden Teile durch die Störungen dieser Planeten notwendig mehr und mehr auseinandergerissen und schließlich zu je einem Trabanten jener Planeten werden.

Anderseits können wir das ganze Sonnensystem als ein einziges Atom betrachten. Alle seine Teile durchwandern den Weltraum mit einer Geschwindigkeit von etwa vier Meilen in der Sekunde so, als ob sie nur ein Körper wären. Käme es auf dieser Wanderung einmal in den Bereich eines wesentlich größeren Systems, so könnte es sich diesem als ein einziges Ganze anschließen, ohne daß dabei notwendig an dem Aufbau unseres Systems etwas wesentliches geändert zu werden brauchte. Unter anderen Umständen könnte es sich aber auch ganz auflösen, indem sich seine Teile mit den anderen wiederum zu einem „gesättigten" System verbinden. In dem hier erörterten Sinne entspricht also der Begriff der chemischen Wertigkeit etwa der Anzahl der besonderen Schwerpunkte eines molekularen Systems, um die sich die Körper gruppieren können. Aber wir wiederholen, daß alle diese Betrachtungen noch in hohem Maße hypothetischer Natur sind.

Wir hatten gesehen, daß mit den Richtungen der Spaltbarkeit der Kristalle alle anderen Eigenschaften zusammenhängen. Diese Richtungen sind durch die Umgrenzungsflächen der Molekularsysteme unmittelbar gegeben. Es zeigte sich, daß die Zusammendrückbarkeit der Kristalle in den Richtungen maximal ist, wo durch den äußeren Druck die Systeme sich noch einander nähern können, ohne ineinander geschoben zu werden. Diese Möglichkeit ist aber nur bei einem Druck gegeben, der nicht senkrecht auf diese Umgrenzungsflächen geübt wird. In dieser senkrechten Richtung aber können auch die Wellenzüge des Lichtes und der strahlenden Wärme am leichtesten den Körper durcheilen und werden deshalb in diese Richtungen abgelenkt. Sind die Begrenzungsflächen, wie bei den irregulären Kristallen, teilweise in sehr spitzen Winkeln zueinander geneigt, so teilen sich die Wellenzüge an dieser scharfen Kante in zwei Richtungen; der Körper wird doppeltbrechend. Nur solche schiefwinkeligen Kristalle haben deshalb diese optische Eigenschaft.

Unseren alltäglichen Anschauungen will es schwer in den Sinn, daß die sogenannten festen Körper aus einer Ansammlung von kleinsten Teilen bestehen sollen, die zwischen sich leere Räume lassen. Wie ist es möglich, fragen wir uns, daß z. B. die Kraft, mit der ein Pferd an seinem Riemenzeug zieht, den schwer beladenen Wagen den Berg hinaufbringt, wenn hier nichts miteinander in wirklicher fester Verbindung ist? Der eigentliche Angriff der Kraft wirkt doch nur auf einige wenige jener molekularen Systeme direkt; diese müssen sie durch den leeren Raum hindurch den nächsten mitteilen und sie zwingen, denselben Weg mit ihnen zu gehen, den der Zug jenen ersten Systemen vorschreibt. Und selbst diese ersten Molekülgruppen werden sicher nicht unmittelbar gestoßen, sondern durch jene scheinbare Fernwirkung bewegt. Welche Annahmen man auch über die Vorgänge in diesen molekularen Sphären machen mag, niemals kommt man über das Vorhandensein jener Zwischenräume zwischen den Molekülen hinweg, und immer muß eine Anziehungskraft den Zusammenhang zwischen ihnen aufrecht

halten. Schon das geschmeidige Riemenzeug, das wir in unserm Beispiel anwendeten, zeigt augenfällig die Notwendigkeit jener Zwischenräume. Wie könnten sich sonst seine einzelnen Teile so leicht gegeneinander verschieben, ohne daß sie für den Zug ihre Festigkeit verlieren? Hier verzweigen und verketten sich offenbar in vielfach verschlungener Weise die miteinander durch ihre gegenseitige Anziehungskraft verbundenen Molekularsysteme und zwingen einander eine gemeinsame „Eigenbewegung" auf, wenn diese zuerst auch nur einer geringen Anzahl durch eine äußere Kraft aufgedrungen wird. Ebenso sehen wir die Weltkörper vielfach einem gemeinsamen Zuge folgen. Sternhaufen mit Tausenden von Einzelsonnen gehen einen gemeinsamen Weg, obgleich jede von der anderen durch ungeheuere Räume getrennt ist; würden wir unsere Sonne aus ihrer Bahn lenken, so könnte dies nicht anders geschehen, als daß auch alle ihre Planeten ihr weiter folgten wie bisher.

Diese gemeinsamen Bewegungen sind die Folge von Strömen jener Uratome, die in bestimmten Gegenden des Raumes in bestimmter Richtung fließen, veranlaßt durch die besonderen Gruppierungen der Materie vielleicht in weit entfernten Orten. In unserer Anschauung ist die Übertragung eines auf eine erste Gruppe von Molekülen direkt geübten Zuges auf die nächstliegenden durchaus mit der uns selbstverständlich erscheinenden Wahrnehmung zu vergleichen, daß in einem stehenden Wasser eine Strömung erzeugt wird, wenn wir einen Gegenstand in ihm in einer bestimmten Richtung bewegen, und daß diese Strömung andere Gegenstände dem ersten dadurch beständig folgen läßt. Daß aber diese Kraft der strömenden Uratome genügend groß ist, beweist allein schon der Zusammenhang der kleinsten Teile eines festen Körpers. Die durch diesen allseitigen Strom scheinbar erzeugte Anziehungskraft ist offenbar gerade so groß wie die Kraft, welche wir gebrauchen, um einen solchen Körper zu spalten.

Daß diese Anziehungskraft ihre Wirkung nur bis zu einer gewissen Grenze fortsetzt, dann aber den notwendigen Raum zwischen den Molekülen bestehen läßt, haben wir gleichfalls bereits verstehen gelernt. Die Moleküle sind mit den Bahnen ihrer Atome als zusammendrückbare feste Körper vom Umfang der äußersten dieser Bahnen zu betrachten. Die festen Moleküle ziehen einander wohl an, leisten aber einer gegenseitigen Durchdringung einen kräftigen Widerstand, der einerseits nur durch Temperatureinflüsse, welche die Bahnen einengen, oder durch starken Druck überwunden werden kann.

Unter Umständen reicht dieser Druck hin, die Durchdringung der molekularen Systeme so weit zu treiben, daß die Atome ihren Zusammenhang mit diesen nicht mehr festhalten können. Es entsteht, oft unter heftigen Explosionen, eine Neugruppierung der Atome zu anderen Molekülen. Solche Explosionen können jedoch nicht stattfinden, wenn die Bahnen der Atome durch Temperaturerniedrigung um dieselbe Größe eingeengt werden, also der ganze Körper so stark verdichtet wird wie durch den oben angenommenen Druck, weil durch Temperaturerniedrigung alle Bahnverhältnisse zugleich reduziert werden, also kein Übergreifen der Atome von einem zum andern Molekül stattfindet. Dagegen kann Temperaturerhöhung eine chemische Umsetzung bewirken, weil durch sie die Bahnen vergrößert werden, während der Abstand der Moleküle oft nicht sofort genügend groß werden kann, um den Atomen den nötigen Spielraum zu lassen. Sie greifen in die nächsten Systeme über und zerstören gegenseitig ihren Bau. Bei genügend langsamer Temperaturerhöhung kann man deshalb explosive Erscheinungen immer vermeiden. Freilich reißen die auch nur an einer kleinen Stelle durch Temperatur- oder Druckerhöhung frei gewordenen Atome ringsherum ihresgleichen mit sich fort und erhöhen

die Temperatur bedeutend durch die plötzliche Umsetzung ihrer gebundenen Energie, d. h. in unserem Sinne der Kraft ihrer Umlaufsbewegung, in freie Energie, geradlinige Bewegung, so daß die Zersprengung der Systeme schnell ringsherum fortschreitet, wenn sie einmal auch nur an der kleinsten Stelle begonnen hat. Selbstverständlich hängt diese Wirkung durchaus von der Bauart der betreffenden Systeme ab, und nur verhältnismäßig wenige Stoffe sind explosiv. Wir haben gesehen, wie künstlich aufeinander getürmt der molekulare Aufbau dieser Stoffe ist. Bei anderen werden wir zwar ähnliche Wirkungen bemerken; sie verlaufen aber wesentlich langsamer, weil der Zusammenhang der Atome in den Molekülen ein weit größerer ist. Aber es gibt für jede Verbindung eine Temperaturgrenze, bei der sie aufhört beständfähig zu sein, die Dissoziationstemperatur.

Lassen wir die Temperatur beständig abnehmen, so nähern sich die Bahnen der Atome immer mehr dem gemeinsamen Schwerpunkt, und gleichzeitig nähern sich die Moleküle einander mehr und mehr. Beim absoluten Nullpunkt findet allseitige Berührung, also auch Bewegungslosigkeit statt. Alle Energie der Uratome, aus denen sich nach unserer Ansicht die Materie einst zusammengesetzt hat, ist aufgezehrt worden, abgesehen von den gemeinsamen Bewegungen des größeren Systems, die auch die ganze Umgebung mitmacht. Auf solche Massen, die den absoluten Nullpunkt einmal passiert haben, üben die Uratome keinerlei andere Wirkung mehr aus als die der Schwerkraft, welche die Masse als Ganzes in der Strömung mit forttreibt. Da aber die Uratome nicht mehr zwischen die Maschen der dicht aneinander gedrängten Atome einzudringen vermögen, so können sie sie auch nicht mehr einzeln zu neuen Temperaturschwingungen oder zur Bildung molekularer Systeme veranlassen; jede Wärme-, Licht-, elektrische und chemische Wirkung solcher einmal so weit abgekühlten Stoffe hört auf. Sie bilden ein unteilbares Ganze, ein neues Atom, das nur von einer größeren Masse, als der seinigen, unter katastrophenartigen Umständen zertrümmert und mit ihr vereint werden kann. Wir denken uns also die bisher als unteilbar erkannten chemischen Atome aus einer Vereinigung kleinerer Atome entstanden, die einmal durch den absoluten Nullpunkt gegangen sind.

Es ist bekannt, daß es modernen technischen Mitteln gelungen ist, Temperaturen zu erzeugen, die nur noch wenige Zehner von Graden von dem absoluten Nullpunkt entfernt liegen. Freilich ist ein weiteres Fortschreiten in dieser Richtung mit immer größeren Schwierigkeiten verbunden, und es ist wenig Hoffnung vorhanden, daß wir diesen Fundamentalpunkt jemals wirklich erreichen werden. Außerdem ist es mehr wie wahrscheinlich, daß jene allgemein angeführten 273 Grad unter Null diesen Punkt nicht richtig angeben. Man wird finden, daß wir uns diesem Punkte nur „asymptotisch“ nähern können, da er in Wirklichkeit immer weiter in eine menschliche Unendlichkeit rückt, je mehr wir ihm nahe zu kommen meinen. Nur in den uns zugänglichen Grenzen bleibt die Annäherung eine scheinbar gleichmäßige, so daß wir ein Gay-Lussacsches Gesetz aufstellen konnten. In den „außermenschlichen“ Regionen, mögen sie nun in molekularen oder in Weltraum-Dimensionen oder sonst weit abseits vom Normalen liegen, haben noch alle Gesetze Korrektionen erfahren müssen.

Hätten wir aber wirklich den absoluten Nullpunkt erreicht, so müßten wir in ihm die merkwürdigsten Erscheinungen wahrnehmen. Ein Stück Glas z. B., das wir dieser Temperatur aussetzen, müßte undurchsichtig und absolut hart werden und es immer bleiben; es würde sich weder kalt noch warm anfühlen, weil es weder Wärme abgeben noch aufnehmen kann. Auch unter den höchsten Hitzegraden würde man es nicht mehr schmelzen können, noch wäre es elektrisierbar oder in eine chemische Verbindung zu bringen; überhaupt wäre es physikalisch wie chemisch völlig

indifferent bis auf seine Schwere, die es bei dem Vorgang nicht verändert hat. Nur die Schwerkraft bleibt auch über den absoluten Nullpunkt hinweg unveränderlich.

Im Bereich unseres Sonnensystems oder in dem von Sonnen erfüllten Universum, soweit wir es überblicken, kann der absolute Nullpunkt höchstens unter ganz besonderen Umständen in kleinen Gebieten bestehen, vielleicht überhaupt nicht erreicht werden. Die überall den Raum durchschwirrenden Lichtstrahlen zeigen an, daß die Materie rings um uns her noch die lebhaftesten Bewegungen ausführt, sowohl in ihren molekularen Dimensionen wie im Umschwung der Himmelskörper selbst. Wie wir gesehen haben, können zwar unter Umständen zwei Uratome so zusammenstoßen, daß sie miteinander verbunden bleiben und ihre fortschreitende Bewegung gegenseitig aufheben; auf diese Weise sind wir zu den chemischen Atomen ja allmählich emporgestiegen. Aber wir haben von vornherein darauf hingewiesen, daß erstens solche genau zentralen und entgegengesetzt gerichteten Zusammenstöße äußerst selten eintreten, und daß zweitens solch ein Aufbau der Welt aus einem angenommenen Urzustand eine Abstraktion bleiben muß, die wir nur benutzen, um unsern Erkenntnisweg vom Einfachsten aus antreten zu können. In Wirklichkeit nehmen wir an, daß die Verteilung der Materie und ihrer Energie von allem denkbaren Anfang an immer eine ungleichmäßige gewesen ist.

Je nachdem durch die Umwälzungen der Materie der Strom der Uratome mehr in eine bestimmte Richtung geführt wurde, erhöhten sich deren Wirkungen in einem bestimmten Gebiet; sie ließen Welten entstehen und umgekehrt zu Grunde gehen oder, besser gesagt, ruhen, bis ein neuer Strom neue Kräfte ihnen zuführte. Die Materie, welche heute unsere Welt zusammensetzt, hat auch schon einmal geruht. Wie wir in den fernen Nebelflecken des Himmels ungeheuere Gasmassen gleichmäßig ohne scheinbare Bewegung den Raum ausfüllen sehen, fern von großen Materiezentren, die ihnen Wärme zustrahlen könnten, so war wohl auch die Materie unter unseren Händen einst sich selbst überlassen. Die Bewegungsenergie verminderte sich durch beständige Zusammenstöße innerhalb der eigenen Masse, was gleichbedeutend mit Verminderung der Temperatur ist. Überall bildeten sich Materieknoten von maximaler Dichtigkeit, die also den absoluten Nullpunkt wenigstens nahezu erreicht hatten. War die Materie vorher ziemlich gleichmäßig verteilt, so mußten auch jene Materieknoten zu der gleichen Zeit ungefähr gleich groß sein, denn sie wuchsen ja unter gleichen Umständen. So sind in den Nebelflecken des Himmels nur wenige chemische Elemente vorhanden: Wasserstoff, der überall zu finden ist, Stickstoff und ein noch unbekanntes Element, vielleicht der Urstoff, aus dem die Atome der heutigen chemischen Elemente sich einst aufgebaut haben. Waren aber in jener sich selbst überlassenen Welt bereits Moleküle höherer Ordnung gebildet, in denen die Atome in Systemen der vielfach beschriebenen Art ihren gemeinsamen Schwerpunkt umkreisten, so werden nun beim Passieren des absoluten Nullpunktes aus den früheren Molekülen neue größere Atome entstehen, die die Grundlage zu einer Weltentwickelungsstufe höherer Größenordnung als der auf den Nullpunkt zurückgesunkenen bilden müssen, sobald die Wolke, der Nebelfleck, auf seinem Weg in ein Gebiet höherer Temperatur, größerer allgemeiner Schwingungsenergie der Uratome, gelangt.

Aber auch ohne die höhere Temperatur können die größeren Atome wieder zu Molekülen sich vereinigen, neue Systeme höherer Ordnung bilden, denn die Schwerkraft, die diese Systeme schafft, hört ja beim absoluten Nullpunkt nicht auf, unverändert zu wirken. Für diese höhere Stufe langsamerer Bewegung größerer Massen herrscht also notwendig ein anderer absoluter Nullpunkt, denn auf die Bewegungen der Himmelskörper z. B. kann eine Abkühlung

des Weltraums zunächst keinen Einfluß haben. Aber auch diese Bewegungen müssen einst aufhören. Die Planeten werden sich der Sonne mehr und mehr nähern und schließlich mit ihr zusammenfallen. Dann ist der absolute Nullpunkt alles Geschehens auch für diesen ganzen Materiekomplex eingetreten, bis er in die Nähe eines größeren gelangt, mit dem er ein neues System, ein neues größeres Molekül bilden kann. Es ist aus dem Weltkörpermolekül, das wir Sonnensystem nennen, ein Atom geworden, und völlige Ruhe muß herrschen. Atome werden also nicht nur durch die Zusammenstöße der Uratome erzeugt, sondern es entstehen deren bei jedem Entwickelungskreislauf der Materie in immer weiter aufsteigenden Größenverhältnissen.

Neben den physikalischen und chemischen Wirkungen der Materie, die wir bisher betrachtet haben, und die überall gegenwärtig am Bau und Kreislauf des Geschehens vor unseren Augen beständig mitwirken, steht die Elektrizität gesondert da, deren Wirkungen wir nur unter besonderen Verhältnissen wahrnehmen, und die doch nach näherer Prüfung sich ebenso allgegenwärtig erweist wie z. B. die Wärme. Wir haben schon zu Anfang unserer gegenwärtigen Betrachtungen gesehen, daß die Möglichkeit, elektrische Wirkungen hervorzubringen, zufolge der hier entwickelten Grundansichten in einer Rotation der kleinsten Teile besteht. Eine solche Rotationsbewegung muß jedes Uratom erhalten, das mit einem andern einmal zusammengestoßen, dann aber weiter geeilt ist. Da aber jedes Molekül bis zu einem gewissen Grad als ein fester Körper anzusehen ist, so wird auch die kreisende Bewegung der Atome in ihm einer Rotation des Moleküls entsprechen, und auch dieses als Ganzes kann elektrische Wirkungen erzeugen. Es gehört dazu, wie wir in unserm elektrischen Kapitel (S. 346) näher erörtert haben, eine systematische Ordnung der Bewegungsrichtungen dieser Rotationen, die in einem unelektrischen Körper nach allen Richtungen gleichmäßig verteilt sind.

Einer kräftigen mechanischen Einwirkung (Reibung) gelingt es in gewissen Fällen, solch eine besondere Richtungsordnung zu veranlassen. Gewisse Substanzen sind durch ihre besondere Struktur geneigt, eine bestimmte Bewegungsrichtung vorherrschen zu lassen. Sie sind somit vorwiegend nur in einem bestimmten Sinne zu elektrisieren, während die kleinsten Teile des anderen, an ihnen geriebenen Stoffes, dem Prinzip von Wirkung und Gegenwirkung entsprechend, die andere Richtung annehmen müssen. So trennen sich die beiden Elektrizitäten. Je nach ihrer Struktur werden gewisse Stoffe vorwiegend negativ, andere positiv elektrisch; doch ist dies keine spezifische Eigenschaft. Es gibt Stoffe, die positiv oder negativ elektrisch werden, je nachdem sie mit anderen zusammenkommen, die mehr oder weniger als sie für eine bestimmte Richtung veranlagt sind. Wir haben bei der Elektrizität stets nur mit polaren Wirkungen zu tun, deren gleiche Gegenwirkung nur bei entsprechender Versuchsanordnung getrennt und auf verschiedene Stoffe übertragen wird. Bei einigen Stoffen, den Nichtleitern, wie Glas u. s. w., nehmen nur die direkt durch äußere Einwirkung beeinflußten Teile die betreffende gleiche Bewegungsrichtung an. Sie überträgt sich nicht auf die umgebenden Moleküle in das Innere der Substanz. Wohl aber wird diese elektrische Rotationsbewegung auf die zwischen den Molekülen hindurchschwirrenden Uratome des Äthers übertragen, die sie mit der ihnen eigenen Geschwindigkeit von 300,000 km in der Sekunde weiter befördern.

Die Substanzen, die wie Glas eine besondere Struktur physikalisch wie chemisch deutlich verraten, und die deshalb nur auf ihrer Oberfläche zu elektrisieren sind (statische Elektrizität), lassen die auf den Äther übertragenen elektrischen Wirkungen doch leicht zwischen den Maschen ihres molekularen Gewebes hindurch; sie sind Dielektrika. Für jene elektrischen Wellen sind also diese Maschen sehr weit, und deshalb gelang auch die Übertragung von

Molekül zu Molekül nicht. Andere Stoffe dagegen, die **elektrischen Leiter**, sind molekular derartig aufgebaut, daß sie die von außen kommende elektrische Wirkung sofort auf die umgebenden Moleküle übertragen können. Ihr ganzer Körper wird bis in ihr Inneres elektrisch, so daß sie die elektrische Wirkung sofort weiterleiten und sie, z. B. bei Reibung, nicht unmittelbar bemerkbar wird, wie bei Nichtleitern. Diese Leiter müssen also elektrisch wesentlich dichter gebaut sein als die Nichtleiter, weshalb sie auch die auf den Äther übertragenen Wirkungen nicht durch ihren Körper hindurchlassen: sie leiten die Elektrizität, sind aber für sie undurchsichtig. Bei ihnen ist der Vorgang gerade umgekehrt wie bei den Dielektrika. Wir wissen, daß zu diesen Leitern in erster Linie die **Metalle** gehören, die auch für das Licht die undurchsichtigsten aller Stoffe sind. Die Oberfläche der Leiter teilt die elektrischen Schwingungen den benachbarten Dielektrika, zum Beispiel der Luft, oder besser, den sie durchschwirrenden Uratomen mit, und es entstehen **Ätherwirbel**, deren Achse mit der der Leiter zusammenfällt, wie die auf Seite 345 mitgeteilten Versuche mit Eisenstaub deutlich zeigen. Je nach dem Widerstand, den die Fortpflanzung der Wellen in diesen die Leiter umgebenden Dielektrika findet, bemißt sich, wie Hertz (S. 378) nachgewiesen hat, ihre Geschwindigkeit, nicht nach der Beschaffenheit der Leiter selbst. Sie ist im sogenannten leeren Raume gleich der des Lichtes und in den mit Materie angefüllten Räumen entsprechend langsamer. Diese elektrischen Ätherwirbel sind die Urheber der Anziehung und Abstoßung, durch die wir das Vorhandensein der Elektrizität am ersten erkennen.

Die besondere, noch nicht aufgeklärte Molekularstruktur der Metalle bedingt auch die Spaltung der Elektrizitäten bei ihrer Berührung mit den sogenannten **Elektrolyten** in den galvanischen Batterien. Jede Annäherung zweier verschiedenartigen Moleküle muß bereits zu dem Bestreben führen, die Bewegungsrichtungen ihres Umschwungs in bestimmter Weise gegenseitig zu ordnen, und jede Berührung muß die Elektrizitäten bis zu einem gewissen Grade spalten. Aber nur unter besonderen Umständen kann dies zutage treten, weil immer die Elektrizitäten sich so schnell als möglich wieder auszugleichen suchen, sobald die Ursache der Spaltung, die nahe Berührung, aufhört. Die Berührung der metallischen Leiter mit den elektrolytischen Flüssigkeiten ist besonders geeignet, die Elektrizitäten zu spalten, wobei die besondere Anordnung der galvanischen Batterien an beiden Elektroden die Wirkung in der S. 579 geschilderten Weise erhöht. Bei diesen Vorgängen finden stets chemische Umsetzungen statt. In den dichten Maschen der metallischen Gewebe ordnen sich die Atome in den Molekülen um und bedingen dadurch zugleich die auf beiden Seiten entgegengesetzte Bewegungsrichtung der neuen Moleküle, die wir nun **Jonen** nennen. Umgekehrt kann eine durch einen irgendwie erzeugten galvanischen Strom hervorgebrachte, in den beiden Elektroden entgegengesetzte Rotationsrichtung auf die den Elektrolyten umgebenden Moleküle so einwirken, daß er in umgekehrter Weise die Atome zu neuen Molekülen ordnet oder diese spaltet (**elektrolytische Zersetzung**).

Daß die elektrischen Wirkungen nur in den Batterien durch Vermittelung chemischer Vorgänge erzeugt werden, sonst aber auf einem durch irgendwelche Art hervorgebrachten Wirbel der Uratome oder des Äthers beruhen, zeigten die **elektromagnetischen Erscheinungen**. Wir sehen deutlich, daß in einem Magneten Kräfte vorhanden sind, die andere magnetische Körper in sein Inneres in der Richtung seiner magnetischen Achse zu ziehen streben, als wenn hier ein wirklicher Wirbelsturm durch eine Röhre sich drängte. Wir konnten darum die magnetischen Erscheinungen dadurch erklären, daß wir in den Magneten die molekularen Rotationsrichtungen als zwei getrennte gegenüberstehende Abteilungen ansahen, in denen die Moleküle

sich zu zweien immer wie ineinander greifende Zahnräder bewegen. In dem Magneten sind gewissermaßen die beiden Elektrizitäten in ein und demselben Körper getrennt. Eine solche ungewöhnliche Anordnung muß in den betreffenden Körpern Veranlassung zu bemerkbaren Spannungen geben, die in den Magneten auch beobachtet werden, und kann nur durch ungewöhnliche Eingriffe entstanden sein. Wie wir mitteilten, haben die natürlichen permanenten Magneten ihre Eigenschaft wahrscheinlich durch Blitzschläge gewonnen, die wohl die Gewalt haben mochten, längs ihrer Bahn die Moleküle durch Vermittelung der Ätheratome in entgegengesetzte Wirbelbewegung zu bringen. In den elektromagnetischen Maschinen gelingt es uns, durch rein mechanische Mittel sehr kleine magnetische Wirbel fast beliebig zu vergrößern und durch sie in den Leitern wieder strömende Elektrizität zu erzeugen, die somit auf ausschließlich mechanischem Weg ohne jede molekulare Umsetzung entstand. Die Ursachen sowohl wie die Wirkungen liegen hier in der greifbaren Welt. Die Welt der Moleküle spielt hier nur noch eine vermittelnde Rolle.

2. Die Welt des Greifbaren.

Jene verborgene Welt der Atome, in der wir uns bisher bewegten, verrät sich uns nur durch die Summe ihrer Wirkungen in greifbaren Dimensionen, die unseren Sinneseindrücken zugänglich sind. Man hat lange gezögert, zu jenen atomistischen Hypothesen seine Zuflucht zu nehmen, aber die Gesetze der kinetischen Gastheorie, die mit ihnen übereinstimmenden Erscheinungen des osmotischen Druckes in den Flüssigkeiten, die Zusammendrückbarkeit, Elastizität und viele andere Eigenschaften der festen Körper nötigten unerbittlich die Überzeugung von der Zusammensetzung der Materie aus kleinsten Teilen auf, die miteinander in die verschiedenen Beziehungen treten. Diese bedingen in ihrer Gesamtheit die sichtbaren und greifbaren Eigenschaften der Stoffe, wie wir sie im täglichen Leben und im Laboratorium kennen gelernt haben. Daß die Gegenstände in unseren Händen uns trotz ihrer unendlich vielen Teile als einheitliche Ganze erscheinen, ist die Folge der groben Struktur unserer Sinne, die unbedingt nötig ist, wenn wir uns in dieser Vielheit zurechtfinden sollen. So faßt das Gefühl den Druck von unzählbaren Schwingungen von Atomen in ihren Molekülen als den eines einzigen Körpers auf, den wir als Ganzes in das Gefüge der größeren Systeme sich einreihen sehen, die unter unseren Augen gemeinsame Wirkungen ausüben. Wollen wir in der uns umgebenden Welt des Greifbaren die Wirkungen dieser Materieansammlungen weiter verfolgen, so können wir bis zu einem gewissen Grade, mit bestimmten, durch die neuen Verhältnisse bedingten Korrektionen, dieselben Gesetze auf diese größeren Systeme weiter anwenden, die wir für die molekularen gefunden oder eigentlich nur aus den Wirkungen dieser größeren Systeme abstrahiert hatten. Einen Stein z. B. müssen wir als ein bis zu einem gewissen Grad unteilbares Ganzes, einem Atom vergleichbar, ansehen, um zu untersuchen, wie er sich nach Abzug seiner Schwere freischwebend verhält, wenn ein zweiter Stein mit ihm zusammenstößt, ohne ihn zu zertrümmern. Nur aus dem dabei beobachteten Verhalten schließen wir auf das der wirklich unteilbar gedachten Atome. Wir entwickeln auf diese Weise eine Mechanik der starren Körper und eine Hydraulik. Freilich lassen sich die Grundsätze der Mechanik auch auf rein mathematischem Wege nach Voraussetzung des Gesetzes der Trägheit und der Undurchdringlichkeit der Materie ableiten. Bewegen sich zwei Körper in bestimmten Richtungen gleichmäßig schnell derart, daß diese Richtungen sich in einem Punkte kreuzen, so

läßt sich aus den gegebenen Elementen der Bewegung und der Körperform genau voraussagen, wie die Bewegung nach dem Zusammenstoß sein wird. Wir brauchen dazu keine Erfahrung. Alle Gesetze der Mechanik, das des Parallelogramms der Kräfte, des Schwerpunkts, des Gleichgewichts, des Hebels und so fort, sind reine logische Folgen des Trägheitsgesetzes. Es ist ganz gleichgültig, welche anderen Eigenschaften wir der Materie noch weiter zusprechen: diese Gesetze der Mechanik müssen erfüllt werden.

Aber die Erfahrung konnte es doch nur allein sein, die in immer und immer wiederholten Fällen zeigte, daß jenes Trägheitsgesetz unbedingte Gültigkeit hat, weil die Erscheinungen den aus ihm abgeleiteten Schlüssen Folge leisten. Aus diesem Grunde sind alle uns auf den ersten Blick selbstverständlich erscheinenden Sätze der einfachen Mechanik von grundlegender Bedeutung für die Erklärung aller anderen Vorgänge, und darum konnten wir allein diese Grundsätze mit in unsere Betrachtungen über die Vorgänge in der ewig unsichtbaren Welt der Atome hinübernehmen, ohne Gefahr zu laufen, die Summe unserer unkontrollierbaren Hypothesen, die wir zum Ausgangspunkt nahmen, zu vergrößern. Wir sagen im Gegenteil, daß die aus der Welt des Greifbaren eingeführten Gesetze nur in jener unsichtbaren Welt der Atome unbedingte Gültigkeit haben können, weil nur hier die Bedingungen der ungestörten Bewegung und der Unteilbarkeit der bewegten Körper erfüllt werden. Deshalb haben auch die mathematisch abgeleiteten Gesetze der Mechanik stets nur eine bedingte Gültigkeit in unserer Welt des Greifbaren. Wir haben überall eine ganze Reihe von Korrektionen anzubringen, bis wir die Übereinstimmung mit den einfachen Gesetzen der Natur überhaupt erreichen.

So werden die Gesetze des Stoßes wegen der mehr oder weniger großen Elastizität der greifbar großen Körper andere, als sie für vollkommen harte Körper abzuleiten sind. Denn durch den Stoß werden die nächstbeteiligten Moleküle zusammengedrückt, üben aber sofort eine entsprechende Gegenwirkung, wodurch der stoßende Körper wieder zurückgeschleudert wird. Können die molekularen Bewegungen nach dem Stoß nicht sofort wieder ihre frühere Ausdehnung annehmen, so wird durch ihn Wärme erzeugt, wie wir es in den meisten Fällen beobachten.

Ein Körper heißt warm oder kalt in Bezug auf unser Empfinden, wenn seine Wärmeschwingungen größer oder kleiner sind als die der Enden unserer Gefühlsnerven, wenn also diese entweder zu größeren Schwingungen durch die Berührung oder vielmehr Annäherung veranlaßt werden oder von ihrer latenten Energie an den berührten Körper abgeben müssen. Aber die für unser Verständnis unendlich vielen Stöße, die bei solcher Gelegenheit in jedem Bruchteil einer Sekunde unsere tastende Fingerspitze treffen, vereinigen sich in unserer Empfindung zu einem einzigen Wärmereiz. Wir haben gesehen, wie sehr wir unsere Beobachtungsmethoden verfeinern mußten, um über die Temperaturerscheinungen nähere Auskunft zu erhalten. Ebenso steht es mit den Lichtreizen. Die Billionen von Schwingungen, die der Äther in der Sekunde macht, empfinden wir als einheitliche Farbenwirkung, deren Art uns aber, ebenso wie die Wärmeeindrücke, immer etwas über das gegenseitige Verhältnis der Schwingungsdauer sagt. Endlich begegnen wir auch bei den Tonempfindungen denselben Verhältnissen, die wir in diesem Gebiet sogar mit dem Auge kontrollieren können, weil die Schnelligkeit der Tonschwingungen noch in Grenzen liegt, die unter bestimmten Versuchsanordnungen direkt überblickt werden können.

Die Sinne im Verein mit unserem Geiste sind hier in der Lage eines Feldherrn, der nur die Bewegungen der Regimenter als Ganzes übersieht und dieser Zusammenfassung durchaus bedarf, um seine Dispositionen richtig treffen zu können; ebenso wird ein weiser Herrscher nur

den großen Zügen der Ereignisse seine Aufmerksamkeit schenken, ohne sich durch Beobachtung oder Eingreifen in Einzelheiten zu zersplittern. Jeder einzelne Mensch ist ein solcher Herrscher über die Materie. Mit jeder Handbewegung bringt er ungeheuere Revolutionen in seiner Umgebung hervor, und Myriaden von molekularen Weltsystemen müssen je nach seinem Willen andere Gruppierungen annehmen. Er selbst weiß und fühlt nichts von diesen Umwälzungen, sondern erkennt nur den veränderten Zustand des Ganzen und bestimmt, ob dieser für seine Zwecke vorteilhafter oder nachteiliger ist als der frühere Zustand. Danach richtet er seine Eingriffe in diese unendlich verzweigten Weltkonstitutionen ein, die seiner Willkür überliefert sind. Der menschliche Geist leitet also das Weltgeschehen in einem begrenzten Umfang und in großen Zügen zu seinen Gunsten und, da er ein Teil der Natur ist, auch zu ihrem Nutzen, wenn er mit Vernunft sein Wohl sucht, ohne das seiner Mitmenschen zu schädigen. Dies ist der ideale Egoismus, dessen Grundzug wir durch alle Gebiete der Natur verfolgen können, auch durch die der toten, in der es ebenso wie in der lebenden Natur einen unerbittlichen Kampf ums Dasein gibt, der überall das Einzelne zwingt, sich der Allgemeinheit nützlich unterzuordnen, widrigenfalls es ausgestoßen wird.

In diesen größeren Zügen, unter denen uns das Gewirr der hastenden Atome aus den Augen entschwindet, wollen wir nun den Aufbau der Natur weiter verfolgen.

Betrachten wir die Tätigkeit der Natur in unserer Umgebung, so erkennen wir überall ein Emporstreben zu größeren Organisationen, zu Systemen höherer Ordnung. Die allmähliche Abkühlung der Erde, die unzweifelhaft seit ihren Urzeiten stattgefunden hat, ermöglichte die Gruppierung der Materie zu immer verwickelteren Stoffen, deren Eigenschaften damit immer vielseitiger wurden und für die Weiterentwickelung unserer Natur mehr und mehr Wert gewannen. Ist zwar die Wärme innerhalb gewisser Grenzen eine notwendige Bedingung für die Existenz eines höheren Lebens, so bildet doch ebenso ohne Zweifel das allmähliche Herabsinken der Temperatur ein mächtiges Förderungsmittel für die emporschreitende Entfaltung der gesamten Natur. Bei sehr hohen Temperaturen bleibt die Materie im Gaszustand, und die Atome der chemischen Elemente verbinden sich höchstens zu zweien miteinander, während verschiedene Elemente noch keine Verbindungen miteinander eingehen. Die Bausteine, aus denen sich später eine so unendlich vielseitige Welt aufbauen konnte, wie wir sie vor unseren Augen sehen, schwirren noch chaotisch durcheinander und fügen sich bei der allzu heftigen Bewegung, die ihnen noch innewohnt, nicht zusammen. Erst die sinkende Temperatur nähert sie einander und schafft chemische Verbindungen aus ihnen, die zuerst nur aus wenigen Atomen bestehen, allmählich aber zu größeren Molekülen auswachsen. Aber von Molekül zu Molekül ist noch kein Zusammenhang: ein gasförmiger Körper kann nur untergeordnete molekulare Organisationen schaffen; es kann keine gasförmigen Kristalle, geschweige denn Organismen geben, weder hier noch in einer anderen Welt des Universums. Wohl verwenden die Organismen Gase und haben sie zur Lebensunterhaltung sogar unbedingt nötig, aber sie müssen sie zuvor in den wunderbaren Laboratorien ihres Körpers umwandeln und in flüssige oder feste Verbindungen bringen.

Nähert nun aber die sinkende Temperatur die Moleküle einander noch mehr, so beginnen sie unter sich Verbindungen höherer Ordnung zu bilden und werden zu Flüssigkeiten. In ihnen erst ist der eigentliche Tummelplatz für die vielseitigen chemischen und physikalischen Verkettungen. Wenn wir den eigentümlichen gelatinösen Zustand der Materie noch einen flüssigen nennen, so ist es dieser allein, in welchem jene höchsten Organisationen

emporblühen können, für die in der gegenwärtigen Entwickelungsstufe der irdischen Natur der Mensch der höchststehende Repräsentant ist. Was in den Organismen bereits fest geworden ist, die Holzfaser, die Zellwände, die Knochen, das ist auch schon leblos, fühllos geworden und dient nur zum stützenden Ausbau für alle die vielverzweigten Räume und Bahnen, in denen der Stoffwechsel und der Kreislauf des organischen Lebens sich vollzieht. Ohne diese Stütze könnten allerdings die Flüssigkeiten allein nicht organisch werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß in den eigentlichen Flüssigkeiten doch nur sehr wenige Moleküle zu größeren Systemen zusammentreten. Beim Wasser vermutet man zum Beispiel, daß deren je vier sich vereinigen. Die Gruppen aber hemmen einander gar nicht oder fast unmerklich an den Bewegungen, die jeder einzelnen von der Schwerkraft vorgeschrieben werden; das Wasser fließt wie jede andere Flüssigkeit, sich selbst überlassen, eben immer bergab. Anders steht es mit dem gelatinösen Zustand. In ihm ist die Materie nicht dichter zusammengedrängt wie in einer entsprechenden Flüssigkeit. Dennoch halten die Moleküle einander fest, während Flüssigkeiten zwischen ihren Maschen zirkulieren können, ja sogar durch die Kapillarwirkung des eigentümlichen Gewebes darin gegen die Schwerkraft aufgetrieben werden. Dieser gelatinöse Zwischenzustand allein, den wir vermutlich als ein kristallinisches Gewebe von molekularen Dimensionen aufzufassen haben, und der zwischen der Flüssigkeit schwebend erhalten wird, konnte die **materielle Grundlage der Lebenstätigkeit** bilden.

So sehen wir auch die unterste Stufe der Lebewesen aus einer schleimartigen Substanz sich zusammensetzen, dem **Protoplasma**, dessen einziges Organ zur Erzeugung des für das Leben notwendigen Stoffwechsels dies Gewebe zu sein scheint. Durch dieses saugt es die zu seiner Nahrung dienenden Stoffe ein, wie eine Kapillarröhre Wasser in sich emportreibt, und stößt die unverdaulichen Reste mit den sich zersetzenden Gewebeteilen seines Schleimkörpers wieder aus. Aber in jenen feinen Maschen gehen von der Aufnahme bis zur Ausstoßung chemische Prozesse vor sich, die in unseren Laboratorien niemals zu wiederholen sein werden, es sei denn, daß man sich dabei der gleichen Gefäße von beinahe molekularen Dimensionen bediente, die durch jene kolloidale Struktur des lebenden Protoplasma dargestellt werden. Daß diese Vorgänge selbst in den einfachsten organisierten Substanzen uns geheimnisvoll blieben, ist wohl zu begreifen, wenn wir uns vorstellen, wie ungemein verwickelt und doch auf das genaueste gesetzmäßig aufgebaut die Molekularsysteme sind, die sich zu jenem Gewebe vereinigen.

Das Protoplasma besteht in der Hauptsache aus **Eiweißsubstanz**, ist aber chemisch wahrscheinlich noch viel komplizierter zusammengesetzt. Die chemische Formel des Eiweiß besteht schon aus mehr als hundert Kernen (s. S. 496), die sich in so künstlicher Weise aufbauen, daß ihre Strukturformel noch nicht aufgestellt werden konnte; sie ist aber jedenfalls so beschaffen, daß beinahe alle organischen Verbindungen leicht aus ihr durch Umlagerung oder Reduktion herzustellen sind. Wir haben hier also, was die mechanischen Wirkungen anbetrifft, aus denen wir die zutage tretenden Erscheinungen zu erklären versuchen, ein System von Hunderten molekularer Planetensysteme vor uns, unter denen sich allerdings nur fünf verschiedenartige Körper, die vier Organogene und der Schwefel, befinden. Nach den auf S. 551 mitgeteilten Untersuchungen über die Kolloide treten aber etwa 14,000 solcher Systeme wieder zu einem neuen Ganzen zusammen, das als **kolloidales Molekül** aufzufassen ist, und diese Moleküle wieder vereinigen sich zu jenem immer noch untermikroskopischen Kristallgewebe, in dessen Maschen jene chemischen Vorgänge geschehen, die wir durch die mechanischen Wirkungen dieser

Atomysteme auf die zwischen ihnen eingeführten Fremdsubstanzen erklären sollen. Wie unendlich einfach sind dagegen die Aufgaben der Himmelsmechanik, die doch den ganzen Scharfsinn unserer hervorragendsten Geister erforderte, um bis zu einem Grade gefördert zu werden, auf den wir noch nicht einmal die Gesamtwirkung von zwei bewegten Körpern auf einen dritten mit ganzer Schärfe in einem einfachen mathematischen Ausdruck zu bestimmen vermögen. Die letzten Geheimnisse der Natur verbergen sich uns überall in jenen unerforschlich kleinen Räumen, die doch wesentlich vielseitiger aufgebaut sind als alle Materiesysteme, die wir unmittelbar überblicken können. Erst wenn die Gesamtheit der unendlich kleinen Wirkungen zu jenen gröberen zusammentritt, die wir mit unseren Sinnen direkt aufnehmen, erscheint uns wieder vieles, wie etwa der Mechanismus des Blutkreislaufs, im Getriebe der organisierten Materie verständlich.

Es scheint durchaus, als ob dieser so komplizierte Eiweißstoff zunächst vorhanden sein müßte, bevor irgend eine andere Lebensregung der Materie und ihr weiteres Wachstum zu immer vielartiger organisierten Systemen möglich sei. Dieser Urstoff alles Lebens, das Protoplasma, ist dabei zugleich die chemisch verwickeltste aller organischen Verbindungen, aus der sich eben alle anderen herstellen lassen. Man müßte demnach annehmen, daß in dieser Hinsicht die Natur einen anderen Weg genommen habe als in ihren anderen Entwickelungsgängen, wo sie von den einfacheren Systemen zu den verwickelteren aufsteigt. Hier wäre der Grundstoff wenigstens so vielseitig aufgebaut wie keiner derjenigen Stoffe, die erst wieder durch seine Vermittelung entstehen. Freilich bauen sich diese „Reduktionsprodukte des Eiweiß" nun in so erstaunlich mannigfaltiger Weise auf, daß schließlich aus dem scheinbar ganz organlosen Protoplasma im Laufe der irdischen Entwickelungsgeschichte der Wunderbau des menschlichen Körpers entstehen konnte.

Wir haben hier die Frage der Entstehung des ersten Lebens auf der Erde oder überhaupt im Weltgebäude berührt. Es gibt bekanntlich extreme „Monisten", die überzeugt sind, daß einstmals alle Lebenserscheinungen auf rein physikalischem, mechanischem Weg erklärt werden. Allerdings würde den sonst in der „toten" Natur gemachten Erfahrungen die Annahme keineswegs widersprechen, daß die Moleküle sich nach und nach zu so großer Kompliziertheit nur durch die chemischen Kräfte aufgebaut haben, durch welche auch die übrigen Verbindungen entstanden sind. Wir sind sogar heute nicht mehr allzu weit von der Möglichkeit entfernt, Eiweiß im Laboratorium herzustellen, das gewiß auch einmal zu Urzeiten sich von selbst gebildet haben kann und sich auch heute noch außerhalb der lebendigen Körper bildet. Beobachtet worden ist dies zwar niemals. Ist die besondere kolloidale Struktur des Eiweiß wirklich einer Art von Kristallisationsprozeß zuzuschreiben, so kann man sich auch das Emporkriechen des lebenden Protoplasmas, das Ausstrecken von Verzweigungen nach Nahrung und andere Bewegungen, die einer ersten Lebensregung zugeschrieben werden, wohl noch mechanisch erklären. Auch die Eisblumen klimmen an den Fensterscheiben empor, und man sieht es oft deutlich, wie Ausläufer der feinen Figuren sich Gegenständen zuwenden, die offenbar allein durch ihre Gegenwart den Kristallisationsprozeß in ihre Richtung lenken und beschleunigen. Was wir über die mechanischen Vorgänge bei der Kristallisation wissen, erklärt diese Erscheinung vollständig. Auch in noch viel verwickelteren Fällen werden wir die physiologischen Erscheinungen im Pflanzen- und Tierkörper physikalisch verständlich machen können, und es ist wohl möglich, daß der ganze Mechanismus der physiologischen Maschinen, selbst bis zu dem der Sinnesempfindungen und des Denkapparates hinauf, einstmals gänzlich erklärt sein wird.

Aber wir stehen persönlich auf dem Standpunkt, den wir an dieser Stelle nicht weiter verteidigen wollen, daß das Bewußtsein unserer selbst und die ganze Welt der Gedanken nichts Mechanisches ist und in letzter Linie auch nicht mechanisch zu erklären ist. Der Körper ist nur das Gefäß des Bewußtseins, das also in gewissem Sinne seine Form annehmen muß, um überhaupt nach außen hin in Erscheinung treten zu können; und dazu brauchen wir den Mechanismus der physiologischen Maschine.

Wie dieses Bewußtsein sich der Materie mitteilen oder in ihr entstehen konnte, ist eine Frage, deren Beantwortung wohl stets dem menschlichen Verstand unerreichbar bleiben wird, und die auf jeden Fall nicht in das Gebiet unserer gegenwärtigen Betrachtungen gehört. Anders steht es mit den rein physiologischen Vorgängen, von denen wir hier wenigstens einen kurzen Überblick geben, weil sich in ihnen die höchsten Betätigungen der Materie offenbaren.

Wir lassen es dahingestellt sein, auf welche Weise das erste Protoplasma entstanden ist. Aus den Untersuchungen über die Urgeschichte der Erde wissen wir nur, daß der Wunderbau der physiologischen Maschinen sich ebenso wie alles andere aus sehr unbedeutenden Anfängen bis zu der Vollkommenheit entwickelt hat, die z. B. unser menschlicher Körper aufweist. Organ fügte sich im Laufe der Zeitalter an Organ zu immer höheren Funktionen bis hinauf zu der ganz unerforschlichen Vielartigkeit unseres Nervensystems mit den denkenden Zellen unseres Gehirns. Wir können diesem ungeheuer weiten Entwickelungsgang auch nicht einmal flüchtig an dieser Stelle folgen, die bändereiche „Naturkunde", der dieses Werk als ein Teil angehört, gibt davon einen Überblick.

Gleich von Anfang an bildeten sich zwei in ihren physiologischen Wirkungen völlig verschiedene Zweige der Entwickelung des Lebendigen, die **Pflanzen und die Tiere**. Es läßt sich praktisch nicht nachweisen, welche der beiden Klassen von Lebewesen auf der Erde zuerst auftrat. Sicher hat sich nicht die eine aus der anderen gebildet, sondern beide aus „protistischen" Geschöpfen, die vor ihnen gewesen sein müssen, und zu denen wir an unterster Stelle eben jene Protoplasmaklumpen zu rechnen haben, denen wir heute noch begegnen. Pflanzen und Tiere unterscheiden sich in ihren physiologischen Wirkungen grundsätzlich voneinander. Man kann ihren Unterschied am einfachsten dadurch klar hervortreten lassen, daß man alle **Pflanzen** ohne Ausnahme chemisch **reduzierende**, also Sauerstoff abgebende physiologische Maschinen nennt, die **Tiere** dagegen **oxydierende**, Sauerstoff bindende. Beide chemischen Reaktionen können unter veränderten Bedingungen im Eiweiß vor sich gehen. Das Protoplasma kann reduzierend und oxydierend wirken. Im pflanzlichen wie im tierischen Körper kommt Eiweiß vor; aber es hat in dem einen verschiedene Funktionen wie in dem anderen. In den Pflanzen ist das Eiweiß in viel geringeren Mengen vorhanden als in den Tieren. Der chemische Bau der Pflanzenteile ist im wesentlichen einfacher als der der Tiere, denn diese bedürfen durchaus derjenigen Moleküle, die in den Pflanzen entstanden sind, um sie als Bausteine für die Organisierung und Erhaltung ihres Leibes zu verwenden. **Nicht ein einziges Molekül nimmt ein Tierkörper direkt aus der leblosen Natur organisch in sich auf.** Die Tiere bedürfen also unbedingt der Pflanzen zur Vorbearbeitung der rohen Materie für den Aufbau ihres Körpers.

Dagegen können die Pflanzen vollkommen ohne die Tiere bestehen. Wenn ihnen nur die genügenden Mengen Kohlensäure in der umgebenden Luft und sonst die äußeren physikalischen Bedingungen, z. B. Licht und Wärme, gegeben sind, so entwickeln sie sich üppig, auch wenn sich nicht ein Tier unter dem Schutze ihres grünenden Blätterdaches tummelt.

Deshalb sehen wir auch in den Urzeiten, als das erste Land die nötige Grundlage dazu gab, die Pflanzenwelt sich bald in einer Großartigkeit entfalten, von der wir uns heute kaum eine Vorstellung machen können, während die Tierwelt des Landes nur durch einige kleine Formen vertreten war, die meist als Insekten auf den Sauerstoff atmenden Pflanzen selbst lebten. Durch die geheimnisvolle chemische Arbeit des Chlorophylls wurde damals ein gewaltiger Reinigungsprozeß der Atmosphäre ausgeführt, der der nachwachsenden Tierwelt den nötigen Sauerstoff schaffte und uns heute den anderen Teil der gespaltenen Kohlensäure, den Kohlenstoff, in den schier unerschöpflichen Stein- und Braunkohlenlagern als einen damals unbenutzt gebliebenen gewaltigen Energievorrat zur Verfügung stellt (s. die Abbildung, S. 607).

Heute freilich sind auch die Pflanzen auf die Tiere angewiesen, denn der Kohlensäurevorrat der Atmosphäre wurde durch den allzu üppigen Pflanzenwuchs allmählich aufgezehrt, und die Luft wurde immer sauerstoffreicher, wodurch sie der Tierwelt eine kräftigere Entwickelung ermöglichte. Wir sehen nach einer kurzen Zwischenzeit der allgemeinen Verarmung in der sogenannten Permperiode die gewaltigen Tierformen der Jurazeit, die Riesensaurier, auftreten, die durch ihre Atmung wieder die den Pflanzen nötige Kohlensäure lieferten. Das *Verhältnis zwischen der Pflanzen- und der Tierwelt* hat sich seither so reguliert, daß weder die Menge des Sauerstoffs noch der Kohlensäure in der Luft einer für uns merklichen Schwankung unterliegt. Aber der Sauerstoff der Luft wird auch durch die überall arbeitenden chemischen Vorgänge in der leblosen Natur verbraucht. Überall sieht man oxydierende Wirkungen, ganz allein die Pflanzen besitzen das Geheimnis, aus verbrannten Stoffen wieder brennbare zu machen. Sie werden deshalb noch auf lange Zeit hinaus, wenn die Sauerstoffarmut der Luft anfängt, fühlbar zu werden, die Erhalter des tierischen Lebens sein.

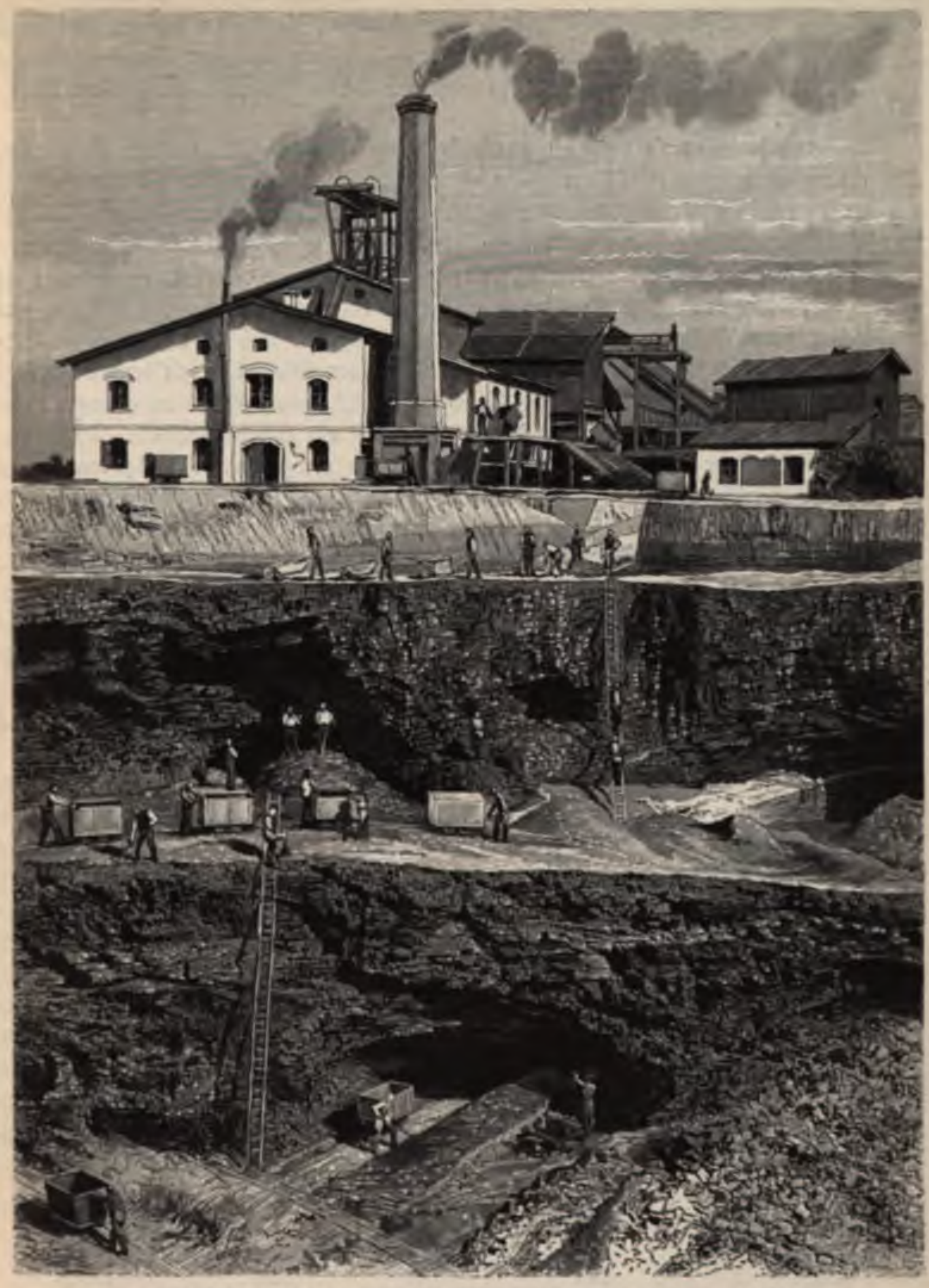
Das Wesen dieses *beständigen Stoffwechsels* in den Pflanzen wie in den Tieren ist in allen Entwickelungsstufen der beiden Klassen der gleiche. Es verzweigen, vervielfältigen, vervollkommnen sich nur die Organe, je nachdem sich die Lebenstätigkeit des Geschöpfes verzweigt; aber wie tausendfältig sich auch die Formen des Lebens ausprägen, es treten immer wieder dieselben Gesetzmäßigkeiten in den physiologischen Wirkungen hervor, die sich in jene beiden von Grund auf verschiedenen Klassen trennen.

Wenden wir uns zunächst den *Pflanzen* zu und sehen wir von den untersten Stufen ab, in denen die Merkmale von Pflanze und Tier oft noch nicht deutlich ausgeprägt sind, nennen wir also eine Pflanze ein Lebewesen, das in der Erde wurzelt und seine Zweige in Luft und Licht ausbreitet, so sehen wir zunächst, daß es von der Wurzel bis zur höchsten Spitze im wesentlichen aus einem System von Kanälen besteht, die oben und unten in die allerfeinsten *Haarröhrchen* auslaufen. Vielfach sind diese feinsten Kanäle durch Querwände in einzelne, sich aneinander reihende *Zellen* getrennt. Alle Wandungen dieser Kanäle und Zellen bestehen aus einem in Wasser unlöslichen Stoffe, der *Zellulose*, die chemisch dieselbe Zusammensetzung wie die Stärke hat, $C_6H_{10}O_5$, aber in ihrer molekularen Gruppierung in dieses faserige, gänzlich unlösliche Gefüge verändert ist. Die Lücken, welche dieses Gefüge läßt, erlauben es, lösliche Stoffe mit Hilfe des osmotischen Druckes, aber nicht Moleküle über einer bestimmten Größe, zwischen den Maschen hindurchschlüpfen zu lassen. So saugt, in physikalisch völlig erklärter Weise, die *Wurzel* die in Wasser löslichen Mineralien ihrer Umgebung in sich auf, und zwar mit einer Auswahl, die von der Gewebsart ihrer Wurzelwände, d. h. von der Art der Pflanze selbst, abhängt. Jede Pflanze sucht sich aus dem umgebenden Boden nur die für sie notwendige Nahrung heraus; ist diese überhaupt in dem Boden nicht vorhanden,



Flora der Steinkohlenperiode.

1. Zahnfarn (Odontopteris). — 2. Schuppenbaum (Lepidodendron) — 3. Cordaites borassifolia. — 4. Pecopteris cyathea. — 5. Kalamiten. — 6. Sigillaria. — 7. Rhizom (Stigmarienform) einer Sigillarie im Wasser. — 8. Blattstern von Annularien.



Braunkohlenlager bei Dux. Nach Neumayr, „Erdgeschichte“. Vgl. Text, S. 606.

so kann sie nicht weiter wachsen, während vielleicht eine andere Art in demselben Boden ganz gut gedeiht, denn einer Anpassung sind die Pflanzen in dieser Hinsicht nur in sehr geringem

Grade fähig. Es ist jedoch beobachtet worden, daß Pflanzen, die Kalium verbrauchen, dieses in der Nähe des Strandes, wo ihnen Natrium als Seesalz in beliebiger Menge zu Gebote steht, gegen jenes vertauschen können; also auch hier tritt die Ähnlichkeit dieser beiden Leichtmetalle hervor.

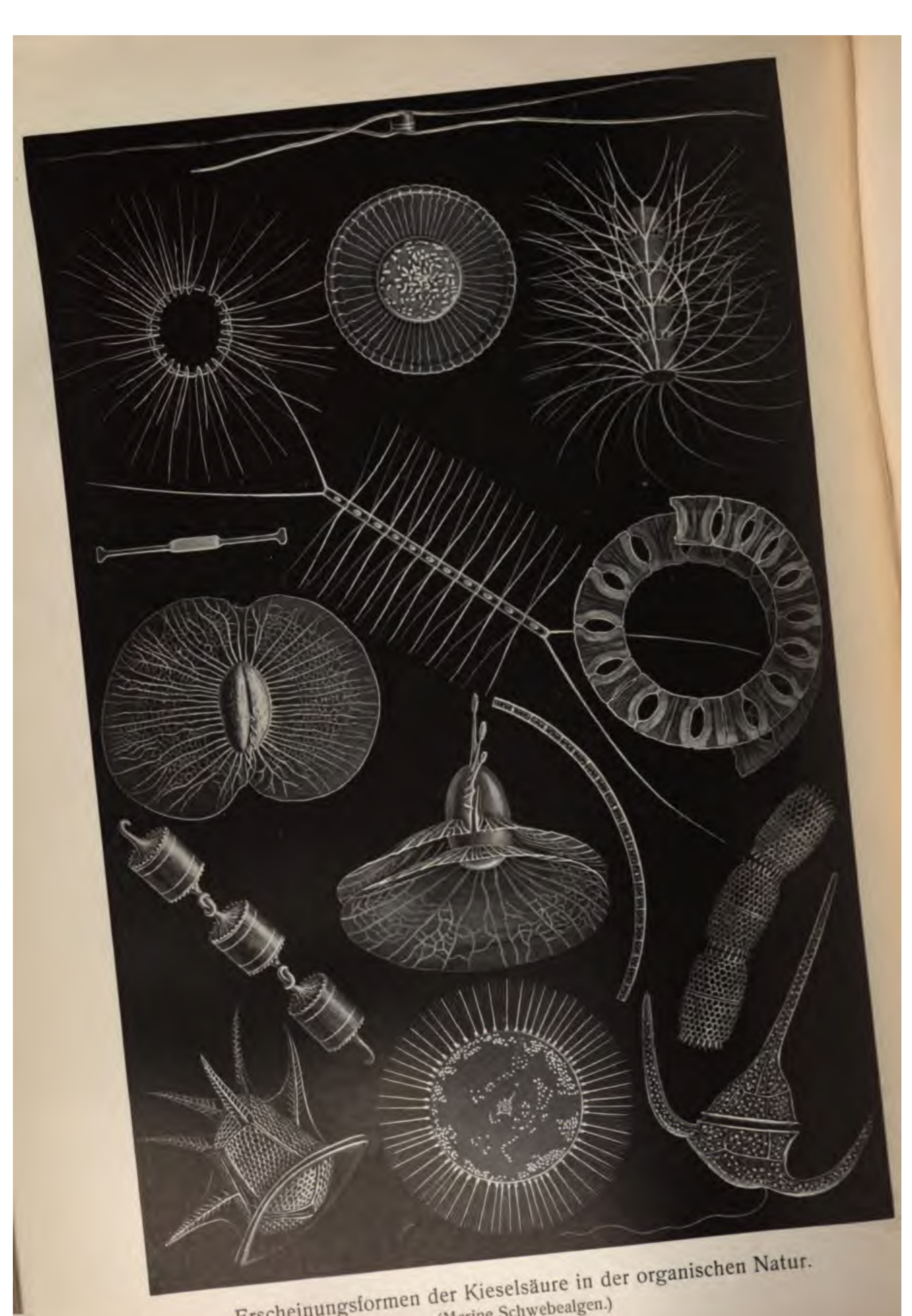
Übrigens brauchen die Pflanzen nur außerordentlich geringe Mengen von Mineralien. Den bei weitem größten Anteil am Pflanzen- sowohl wie am Tierkörper hat das Wasser, das als Lösungsmittel alle Zellgewebe durchsetzt. Dieser Wassergehalt schwankt natürlich sehr in den verschiedenen Teilen der Pflanze. In den weichen Zellgeweben kann der Prozentsatz des Wassergehaltes zur Trockensubstanz gegen 90 Prozent betragen, im harten Holz nur gegen 15 Prozent. Diese Trockensubstanz besteht aber noch zum größten Teil aus den Verbindungen der Organogene, namentlich des Kohlenstoffs. Bei der vollkommenen Verbrennung entweichen auch die Organogene als Gase, der Kohlenstoff mit dem Sauerstoff als Kohlensäure, der Wasserstoff mit dem Sauerstoff als Wasserdampf und der geringe in den Pflanzen enthaltene Stickstoff wieder mit dem Sauerstoff als salpetrige Säure. Die übrigbleibende Asche ist im Verhältnis zu der lebenden Pflanze sehr gering, sie beträgt nur wenige Prozent des Gewichtes, wie ja jedermann aus der Asche des im Ofen brennenden Holzes sieht. In ihr findet man, je nach der Art der betreffenden Pflanze, die Leichtmetalle Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, in seltenen Fällen auch Aluminium. Von den Schwermetallen kommt ausschließlich nur das Eisen vor, wenn man von Spuren von Mangan absieht, die in wenigen Pflanzen entdeckt wurden. Außerdem findet man in einigen Pflanzen noch in geringen Mengen Schwefel und Phosphor, Chlor, bei Algen auch Jod und Brom, sehr selten Fluor, endlich Silicium. Es sind also verhältnismäßig nur wenig chemische Elemente, die am Bau der Pflanzen und überhaupt der Organismen eine maßgebende Rolle mitspielen.

Die Auswahl, welche die verschiedenen Pflanzen unter diesen Stoffen treffen, geschieht in eigentümlicher Weise, die sich durch die Erscheinungen des osmotischen Druckes allein nicht erklären läßt. Es muß vielmehr etwas dem Kristallisationsprozeß Vergleichbares hinzutreten, indem die bereits in den Samen, Keimen und Wurzeln enthaltenen Elementarstoffe ihresgleichen an sich ziehen, wie ein Kristall aus den verschiedensten Lösungen immer nur die in ihnen enthaltenen ihm chemisch gleichen Moleküle anzieht und sich durch sie vergrößert, wächst, wie eben auch die Pflanze. Die verschiedenartigsten Spezies, die auf demselben Boden wachsen, suchen sich immer in gleichen Verhältnissen, die einen mehr, die anderen weniger, von den für sie brauchbaren Stoffen heraus. So gibt Kerner in seinem „Pflanzenleben“ das Beispiel von vier verschiedenen in demselben Sumpfe nebeneinander lebenden Pflanzen, Wasserschere, Seerose, Armleuchter und Wasserrohr (s. die Abbildung, S. 609), von denen der Aschengehalt an Kali, Natron, Kalk und Kieselsäure untersucht worden ist und folgendes ergab:

	Wasserschere	Seerose	Armleuchter	Wasserrohr
Kali	30,82	14,4	0,2	8,6
Natron	2,7	29,66	0,1	0,4
Kalk	10,7	18,9	54,8	5,9
Kieselsäure	1,8	0,5	0,3	71,5

Die Wasserschere braucht hauptsächlich Kalium, die Seerose Natrium, der Armleuchter fast nichts von beiden, dagegen viel Calcium, das Wasserrohr außerordentlich viel Kieselsäure,





Erscheinungsformen der Kieselsäure in der organischen Natur.
(Marine Schwebealgen.)

um damit den harten Panzer seines Schaftes zu bilden; alle drei übrigen verwenden den Kiesel fast gar nicht und bilden das Gerüst ihres Pflanzenleibes hauptsächlich aus Kalk. Trotzdem also die betreffenden Mineralien in ganz anderen Verhältnissen in dem sie umgebenden Boden und seinem Wassergehalt enthalten sind, wählen die einen mehr, die anderen weniger von dem Vorhandenen aus. Ja es kommt vor, daß gerade von einer Substanz, von der kaum merkliche Spuren in der Umgebung zu entdecken sind, am meisten von der Pflanze aufgenommen wird. Die Asche der Seerose enthielt, wie oben angeführt wurde, fast zu einem Drittel Kochsalz; in dem Wasser und Schlamm, aus dem es die Pflanze holen mußte, waren aber nur 0,01—0,03 Prozent dieses Salzes enthalten. Es ist bekannt, daß die in dem sogenannten



Zusammenleben verschiedener Wasserpflanzen mit ungleichem Nahrungsbedürfnis.
a Wasserschere, b Seerose, c Armleuchter, d Wasserrohr. Vgl. Text, S. 608.

„Plankton" unserer Meere (vgl. S. 433) schwimmenden marinen Schwebealgen, Diatomazeen, die wegen ihrer physiologischen Eigenschaften zu den Pflanzen gezählt werden müssen und, nach ihrem Absterben niedersinkend, den Tieren der Tiefsee die auch diesen nötige pflanzliche Nahrung spenden, höchst zierliche Panzer aus Kieselsäure um sich bilden, die auf den Meeresboden niederregnend den Tiefseeschlamm aller unserer Meere zusammensetzen (s. die beifolgende Tafel „Erscheinungsformen der Kieselsäure in der organischen Natur [Marine Schwebealgen]"). Es werden also ungeheure Mengen von Kieselsäure von diesen niedrigsten Pflanzen aus dem Meerwasser geholt, das doch kaum merkliche Mengen davon enthält. Gewisse Tange der Nordsee enthalten bedeutende Mengen von Jod, obgleich dieses Element im Wasser der Nordsee nicht mehr nachgewiesen werden kann.

Man ist hier beinahe versucht, zu glauben, daß die Pflanzen Analysen ausführen, durch die selbst die Elemente der Chemiker noch gespalten werden, oder daß sie Verbindungen herstellen, die aus einem ähnlichen Element ein anderes machen, z. B. aus

Chlor das beinahe viermal schwerere Jod. Jedenfalls sind die chemischen Vorgänge schon bei der Aufnahme der Nährstoffe meist unaufgeklärt.

Die Nährstoffe sind im Boden in Form von Salzen, also an Sauerstoff gebunden, als schwefelsaure, phosphorsaure, kohlensaure, salpetersaure Salze enthalten. Im Laboratorium ist diesen Salzen der Sauerstoff oft nur unter Schwierigkeit zu nehmen; die Pflanze aber vollbringt diese Spaltungen in ihren feinen Haarröhrchensystemen ohne weiteres, aber nur dort. Braucht eine Pflanze Kalium oder irgend ein anderes Element zum Aufbau, so ist es ihr fast gleichgültig, in welcher chemischen Verbindung es ihr im Nährboden zur Verfügung gestellt wird; sie reißt die Verbindung auseinander und nimmt nur den Teil auf, den sie gebraucht. Notwendig ist nur, daß die betreffenden Verbindungen in Wasser gelöst, wenn auch nur in Spuren vorhanden sind, weil sie nur durch dieses in die Pflanze aufgesogen werden können. Die Spaltung geht erst im Körper der Pflanze selbst vor sich, teilweise schon in den feinen Verästelungen der Wurzeln; der durch die zerlegenden Funktionen dieses Organs vorbereitete Saft erfährt später, wenn er durch die größeren Kanalsysteme in die verschiedenen Pflanzenteile durch die Kraft des osmotischen Druckes verbreitet worden ist, an der äußeren Peripherie, z. B. den Verzweigungen der Blattadern, unter dem Einfluß des Lichtes noch weitere Umsetzungen.

Die Rolle, welche die aufgenommenen Mineralien in den Pflanzen spielen, ist sehr verschieden. Kalk, Kieselsäure dienen zur Herstellung der festen Gerüste, des Pflanzenskelettes, das einen vollkommen zusammenhängenden Bau zeigt. Man kann z. B. Gräser, Schachtelhalme u. s. w., die ihre Skelette aus Kieselsäure bilden, vorsichtig ausglühen, wobei das Skelett vollständig in der ursprünglichen Form der Pflanze zusammenhängend stehen bleibt. Der Schwefel gehört zum Aufbau des Eiweißmoleküls. Eiweiß kommt in den Pflanzen allerdings nur in sehr geringen Mengen, am meisten in ihren Samen, vor. Andere Stoffe, wie Kalium, Phosphor, Eisen, kommen für den Aufbau nicht eigentlich in Betracht, sondern scheinen nur eine vermittelnde Rolle zu spielen, indem sie Zwischenverbindungen herstellen, die sich wieder zu neuen Verbindungen umbilden. Kalium scheint bei der Bildung der Stärke, Eisen bei der des Chlorophylls gegenwärtig zu sein, ohne selbst einen Teil dieser organischen Verbindungen auszumachen. Phosphor dient außerdem als Träger anderer einzuführender Stoffe, weil phosphorsaure Salze in Wasser löslich sind; sie werden in solchen Verbindungen nach den Teilen geführt, wo die Pflanze ihrer bedarf. Dort trennt sich der Phosphor von den Stoffen, läßt sie zurück und scheidet selbst wieder aus dem Körper aus.

Aber alle diese Mineralstoffe sind im Leben der Pflanze von untergeordneter Bedeutung gegenüber den vier Organogenen, Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff, die den eigentlichen Pflanzenleib zusammensetzen. Wir unterscheiden hier drei Hauptgruppen von organischen Verbindungen, die eigentlichen Kohlehydrate, also Stärke, Zellulose, Zucker, die Fette und die Eiweißstoffe, zu denen noch das Chlorophyll hinzuzurechnen ist.

Den hauptsächlichsten Bestandteil gibt die Verbindung $C_6H_{10}O_5$ ab, die in den beiden Modifikationen als Stärke und als Zellulose auftritt. Die Stärke bildet sich in unbekannter Weise unter dem Einfluß des lichtbestrahlten Chlorophylls. Da sie der eigentliche Nährstoff aller Lebewesen ist, so liegt in ihrer Bereitung der Ursprung alles Wachstums der organischen Welt. Wiederum fehlt uns jede Erklärung, wie sich die Stärke, ohne daß ihr etwas genommen oder hinzugefügt wird, in die unlösliche und deshalb unverdauliche Zellulose, den Gewebstoff der Pflanzen, das Holz, verwandelt. Würden wir dies Geheimnis der

Natur kennen, wie sie aus Stärke Holz macht, so würde uns wohl auch der umgekehrte Prozeß gelingen; wir könnten aus Holz Stärke, Mehl, Brot machen und uns von dem billigen Holz so gut wie von dem besten Brot ernähren, wenn es gelänge, Holz in Wasser zu lösen, wie es die Pflanze vermag. Die Chemiker sind mit der Lösung dieser Aufgabe, die der Menschheit eine große Erleichterung schaffen würde, eifrig beschäftigt, und es scheint beinahe, als ob sie in nicht allzu ferner Zeit gelingen sollte.

Es ist gewiß ein wunderbares Schauspiel, aus jener Zellulose, die zuerst wie die Stärke in einzelnen voneinander unabhängigen Körnchen auftritt, sich den ganzen Pflanzenleib hervorbilden zu sehen; aber dieser Vorgang erscheint uns doch nicht viel wunderbarer als die Bildung aller jener vielverzweigten Molekularsysteme, deren Erklärung aus den einfachen Gesetzen der Mechanik zwar auch heute noch in weiter Ferne liegt, aber doch einstmals erklärt werden wird. Das Aufblühen der symmetrisch gebauten Blütenkelche kommt uns im wesentlichen nicht viel erstaunlicher vor als das Emporwachsen der Eisblumen am Fenster. Alle Erfahrungen des Pflanzenphysiologen sprechen dafür, daß das Wachstum der Pflanzen und ihre übrigen Lebensregungen wirklich einmal rein mechanisch zu erklären sein werden; eine ganze Reihe der betreffenden Erscheinungen hat man schon ihres geheimnisvollen Schleiers entkleidet.

In einzelnen, besonders organisierten Pflanzenteilen gehen die Organogene noch verwickeltere Verbindungen ein, als z. B. in den vielverzweigten Flächen der Blätter, die den Hauptbestandteil, die Stärke, zu liefern haben. Durch solche Verbindungen werden die besonderen Eigenschaften der Pflanzen bedingt, der Geruch ihrer Blüten oder ihres Zellsaftes, ihre Farbe, der Geschmack ihrer Früchte. Wir haben die chemische Zusammensetzung einer Anzahl dieser Stoffe bei der Aufzählung der organischen Verbindungen bereits kennen gelernt (S. 479) und sahen, daß sie alle nur durch Hinzufügen weiterer Atome der Organogene zu den Hauptbestandteilen der Pflanze oder auch nur aus Umlagerung ihrer Moleküle hervorgehen. Bei allen diesen Verbindungen wird Sauerstoff frei gemacht, was in manchen Fällen sofort bemerkbar wird. Die Früchte des Obstes sind z. B. im unreifen Zustand sauer, nehmen aber allmählich mehr und mehr an Zuckergehalt zu. Aus den zuerst gebildeten organischen Säuren, der Apfelsäure, der Weinsäure u. s. w., wird immer mehr Sauerstoff entfernt; für die $COOH$-Glieder, die für die organischen Säuren charakteristisch sind, treten die CH_2O-Gruppen der Kohlehydrate ein, aus den Säuren wird Stärke und Zucker gebildet. Aber selbst bei der Bildung jener Säuren richten es die Pflanzen so ein, daß aus den Produkten, die sie dazu auswählen, immer noch mehr Sauerstoffatome frei werden, als sie für die Säure brauchen. So entsteht z. B. die Kleesäure aus zwei Molekülen Kohlensäure, $2CO_2$, und einem Molekül Wasser, H_2O; das macht zusammen 2C, 5O und 2H. Die Formel der Kleesäure ist aber $C_2H_2O_4$; es bleibt also ein Sauerstoffatom übrig, das der organische Vorgang entweder aus der Kohlensäure oder aus dem Wasser ausgeschieden haben muß. Die Kleesäure ist die sauerste aller Pflanzenverbindungen; bei allen übrigen werden noch mehr Sauerstoffatome frei.

Von allen pflanzenphysiologischen Vorgängen liefert die Atmung der Pflanzen den meisten Sauerstoff. Wir haben hiervon schon oft in diesem Werke zu reden gehabt. Alle Teile der Pflanze atmen, auch diejenigen, welche nicht direkt mit der Luft in Berührung kommen, also die Wurzeln. Aber der Atmungsprozeß ist in den einzelnen Teilen ein sehr verschiedener. Wir wissen, daß aus der Luft die nur in sehr geringer Menge in ihr enthaltene Kohlensäure eingesogen wird, während die hauptsächlichsten Bestandteile der Luft,

Stickstoff und Sauerstoff, zurückbleiben. Diese Auswahl ist nur den Pflanzen möglich, weil sie nicht durch offene Kanäle die Luft aufnehmen wie die Tiere, sondern von vornherein durch jene kapillaren Öffnungen, die auch sonst bei den Pflanzen die Nahrungsaufnahme ausschließlich besorgen. Unter dem Einfluß des Chlorophylls wird die Kohlensäure in Sauerstoff und Kohle gespalten. Diese Kohle verbindet sich wieder zu Kohlehydraten, Stärke u. s. w., die in alle Teile der Pflanze transportiert und zum Bau ihres Körpers zusammengefügt werden sollen, der Sauerstoff aber wird frei, wird ausgeatmet. Bei der Spaltung der Kohlensäure wird Wärme gebunden, es ist ja ein Reduktionsprozeß. Mit dieser Wärme bindet sich die mit ihr gleichbedeutende freie Arbeitskraft, die in innere Spannkraft, potentielle Energie, verwandelt wird. Durch die Sauerstoffausatmung kann also die Pflanze keine Kraft für die notwendige Bautätigkeit in ihrem Körper gewinnen. Es muß, um diesen Mangel zu beseitigen, wieder ein Teil des Sauerstoffs gebunden und Wärme durch Oxydationsprozesse frei gemacht werden. Neben der Sauerstofferzeugung ist darum auch ein, wenn auch viel geringerer Sauerstoffkonsum vorhanden; zwei entgegengesetzte Prozesse laufen also in der Pflanze bei der Atmung parallel. Namentlich sobald die Sonnenbestrahlung aufhört, ohne die das Chlorophyll nicht seine spaltende Wirkung ausübt, beginnt der Sauerstoffverbrauch vorzuherrschen, in der Nacht atmen die Pflanzen ganz so wie die Tiere Sauerstoff ein und Kohlensäure aus; dasselbe ist dauernd bei den Wurzeln der Fall, die den Sauerstoff aus dem Luftgehalt des Bodens nehmen. Entzieht man dem Boden die Luft oder ersetzt sie durch andere Gasarten, so geht die Pflanze ebenso ein wie bei Luftabschluß der oberen Teile. Man erfährt dies häufig an dem Absterben der Bäume in Städten, wo der Boden große Mengen Leuchtgas festhält.

Überblicken wir den Vorgang der Aufnahme anorganischer Stoffe durch die Pflanze, wodurch der für uns jedenfalls wichtigste aller Kreisläufe der Materie eröffnet wird, so erkennen wir, daß er äußerlich in fast ganz gleicher Weise und in gleichartigen Organen vor sich geht. Das Gefäßsystem der Pflanze verzweigt sich an seinem unteren wie seinem oberen Ende in Kapillargefäße (Haarröhrchen), durch welche die in Wasser gelösten oder gasförmigen anorganischen Substanzen eingesogen und zugleich chemisch umgewandelt werden. Es ist, als ob in diesen feinen Maschen der Zellgewebe eine Durchsiebung stattfände, nach der die getrennten Atome nur in diesen mikroskopisch engen Räumen zu jenen organischen Molekularsystemen zusammentreten, die außerhalb der Kapillargefäße, bei freierer Bewegung der Atome, nicht zu erzeugen sind. Hier allein, in diesen Haarröhrchen, tritt die Materie über die Schwelle des Lebens und kann an jenen wunderbar organisierten Bauten teilnehmen, in denen die Materie sich ihrer selbst bewußt und fähig wird, wenigstens einige Stufen des unendlichen Weltgeschehens zu überblicken.

Aber um zu dieser Höhe emporzusteigen, mußten zuvor wesentlich neue organische Einrichtungen geschaffen werden. Sollte die Empfindungstätigkeit, der Reiz von Freude und Schmerz, der ja auch den Pflanzen schon in einem gewissen Grade gegeben ist, sich zur Entwickelung einer Intelligenz erhöhen, so mußte den Lebewesen eine willkürliche Fortbewegungsfähigkeit zuerteilt werden. Dadurch wurde es in ihre Macht gestellt, den einen Reiz zu erhöhen, den anderen zu vermindern; sie konnten somit ihren geistigen Horizont erweitern und ihre Sinne immer mehr verschärfen. Zu dieser Fortbewegungsfähigkeit gehören aber Maschinen von ganz anderer Bauart, auch abgesehen von den rein mechanischen Werkzeugen der Fortbewegung. Die tierischen Maschinen müssen Arbeit leisten, Lasten heben, während die pflanzlichen Maschinen Arbeit binden, Energie aufspeichern.

Die tierischen Maschinen brauchen Brennmaterial, die pflanzlichen liefern solches. So konnte sich ein Kreislauf der beiden Energiearten zwischen diesen beiden Klassen von Lebewesen entwickeln, der stete Wechselbeziehungen zwischen Pflanze und Tier zeigt. Die Tiere nehmen ausschließlich ihr Heizmaterial von den Pflanzen, wenn wir den aus der Luft aufgenommenen Sauerstoff, der übrigens auch zum Teil von den Pflanzen geliefert wird, und das aufgesogene Wasser ausnehmen. Kein einziges Mineralprodukt kann im tierischen Körper direkt verwendet werden; das Kochsalz allein nimmt eine gewisse Ausnahmestellung ein, indem es, ohne als Nahrungsmittel selbst zu dienen, doch sich den Verdauungssäften fördernd beimischt, während sonst alle anderen Mineralprodukte entweder indifferent sind oder oft schädlich wirken können. Die Pflanzen bilden ein Vorstadium im Entwickelungskreislauf der Materie innerhalb der lebendigen Natur; durch sie wird der leblose Stoff vorbereitet, um in die höhere animalische Stufe eintreten zu können.

Aus diesem Grunde kann man in den Tieren keine anderen mineralischen Stoffe finden als in den Pflanzen; auch das Verhältnis dieser Stoffe zur Trockensubstanz und dieser zum Wassergehalt ist zwischen Tier und Pflanze nicht wesentlich verschieden. Freilich mußten sich die Tiere ein kräftigeres Skelett bauen, um sich für ihre vielseitigere Lebenstätigkeit widerstandsfähig zu machen. Deshalb kommen von den etwa 20 Prozent Trockensubstanz des menschlichen Körpers allein 19 Prozent auf die Knochen. Die übrigen Teile enthalten, wenn wir vom Wassergehalt absehen, kaum 1 Prozent ihres Gewichtes an mineralischen Stoffen.

Da die Auswahl der aufzunehmenden und zu verarbeitenden Stoffe für den tierischen Organismus schon von den Pflanzen besorgt wird, ist der Einverleibungs- (Assimilierungs-) Prozeß der animalischen Lebewesen im Prinzip einfacher geworden; nur, weil wegen der verschiedenen neuen animalischen Funktionen eine weit größere Verschiedenartigkeit der Neubildungen aus den aufgenommenen Substanzen nötig wird als bei den Pflanzen, muß der tierische Organismus um soviel komplizierter aufgebaut werden.

Verfolgen wir den Weg, welchen die Materie durch den tierischen Körper nimmt, und die Verwandlungen, die sie dabei erfährt, etwas genauer an unserm eigenen Organismus.

Während die Pflanze fortwährend, gewissermaßen durch Millionen von unsichtbaren kleinen Mundöffnungen, Nahrung in sich aufnimmt, und der Wechsel zwischen Aufnahme, Verteilung im Körper und Ausscheidung in ein und demselben Kreislauf geschehen kann, können die Tiere die für sie bereits ausgesuchte Nahrung sogleich in größeren Mengen aufnehmen, also in Mahlzeiten mit größeren Zwischenräumen, was ihrer Beweglichkeit und der Zeitgewinnung für höhere Zwecke entspricht. Es wird also im tierischen Organismus zunächst ein ihn durchziehender einheitlicher Kanal gebildet, welchen die Nahrung von ihrer Aufnahme bis zur Ausscheidung des Unbrauchbaren zu durchlaufen hat, und aus dem die verwendbaren Stoffe in den Körper abgeleitet werden. Diesem Durchgangsrohrsystem gliedert sich ein im Körper abgeschlossenes Kreislaufsystem an, das die Ernährung aller Körperteile, den Transport des von jenem vorbereiteten Nähr- und Baumateriales besorgt, der Blutkreislauf. Dieser ist im Gegensatze zur Nahrungsaufnahme fortwährend gleichmäßig tätig.

Die aufgenommene Nahrung ist, obwohl organischer Natur, wenigstens zum größten Teil ohne weiteres noch nicht für einen anderen Organismus brauchbar, weil sie meist unlöslich ist. Dies ist notwendig; denn ein Organismus, sei es nun Pflanze oder Tier, wäre nicht bestandfähig, wenn seine Organe selbst löslich wären. Sie sind ja die Bahnen der gelösten Stoffe,

die den Aufbau besorgen. Auch eine Wasserleitung würde wenig bestandfähig sein, wenn man sie etwa aus Steinsalz herstellte. Es ist also die Hauptaufgabe der chemischen Tätigkeit im tierischen Organismus, die zugeführten Stoffe zunächst *löslich zu machen*, damit sie *transportfähig* werden, sie nachher aber *unlöslich wiederherzustellen*, sobald sie zum Wachstum, *zum Bau der Organe* verwendet werden sollen.

Diese Umwandlungen können, soweit unsere Erfahrung geht, nur in den engen Räumen der *Haarröhrchen*, bez. Zellen geschehen. Es wird also notwendig, die betreffenden Stoffe in Haarröhrchen irgendwo auf ihrem Weg aufzulösen, oder sie mit chemisch wirksamen Zellen in Verbindung zu bringen. Die zur Ernährung des Körpers fertige Flüssigkeit kann also längs des Verdauungsganges immer nur in sehr kleinen Mengen abgesondert werden und wird durch ein besonderes *drittes Gefäßsystem*, die *Lymphgefäße*, gesammelt und vom Verdauungssystem den Blutgefäßen zugeführt. Durch diese drei Gefäßsysteme haben wir den Weg und die Wandlungen der Materie zu verfolgen.

Die Verdauungsorgane des Menschen.
a Mundhöhle, b After, c Speiseröhre, d Magen, e Zwölffingerdarm, f Dünndarm, g Blinddarm, h Dickdarm, i Mastdarm.

Der *Verdauungskanal* (s. die nebenstehende Abbildung) beginnt mit dem Mund a und endet im anderen Körperpol, dem After b. Zwischen beiden unterscheiden wir die Speiseröhre c, den Magen d und die Gedärme; diese zerfallen wieder in den Zwölffingerdarm e, Dünndarm f, Blinddarm g, Dickdarm h und Mastdarm i. Die Verdauungstätigkeit, d. h. das Löslichmachen der aufgenommenen Speisen, beginnt bereits in der *Mundhöhle*. Nicht nur daß im Munde die Vorbereitung dazu, die Zerkleinerung, vorgenommen und die Speise mit Flüssigkeit durchsogen wird, es wirkt auch der *Speichel* bereits lösend, der durch besondere Drüsen nur nach erfolgtem Reiz in den Mund eingeführt wird. Der hauptsächliche und wirksame Bestandteil des Speichels, das *Ptyalin*, ein aus dem Blute hergestellter Stoff, ist ein sogenanntes *Ferment*, ein Gärstoff, der wie bei der Hefegärung durch seine bloße Gegenwart die unlösliche Stärke in den löslichen Zucker verwandelt. Der chemische Vorgang der Gärung ist ebensowenig aufgeklärt wie die anderen chemischen Erscheinungen im

Organismus; aber wir können uns von der Gärung dadurch eine Vorstellung machen, daß wir annehmen, die Zellen des Gärstoffes üben dieselbe Wirkung aus wie die Kapillargefäße in den geschlossenen Gefäßsystemen. Die engen Räume, in denen ausschließlich derartige chemische Zersetzungen und Wiederverbindungen stattfinden, werden hier, wo der Verdauungsgang notwendig noch weit sein muß, durch die Einführung solcher kapillarer Zellkörper dargeboten, die freilich in den hier in Betracht kommenden Fermenten noch nicht entdeckt, aber wohl sicher vorhanden sind. Damit kann sofort die Verdauung selbst beginnen. Wenn man Brot mit Speichel anrührt und einige Zeit stehen läßt, verwandelt es sich auch außerhalb des Organismus in Zucker, was bekanntlich chemisch dadurch geschieht, daß der Stärke die Bestandteile von einem Molekül Wasser hinzugefügt werden.

Aber der Gärungsvorgang, der immer nur langsam vor sich geht, kann während der kurzen Zeit, die die Speisen im Munde verweilen, nur eingeleitet werden. Dagegen bleiben sie, nachdem sie die Speiseröhre schnell durchwanderten, längere Zeit im **Magen** (a der nebenstehenden Abbildung), wo die Gärung fortschreitet. Die mechanischen Bewegungen des Magens setzen auch die Zerkleinerung des Speisebreies fort. Die Schleimhaut des Magens sondert wieder ein anderes Ferment, das **Pepsin**, aus, und es tritt freie **Salzsäure**, etwa 0,02 Prozent des Magensaftes, dazu, so daß dieser sauern Geschmack erhält. Während das Ptyalin hauptsächlich nur auf die Stärke lösend wirkt, greift der Magensaft auch die Eiweißstoffe an, die immer in den Nahrungsmitteln enthalten sind. Deren dritter Hauptbestandteil aber, die Fette, widerstehen beiden Verdauungssäften und verlassen den Magen noch unverdaut. Sie hindern deshalb die Verdauung der anderen Speisenarten unter Umständen dadurch, daß sie einen Überzug um die noch nicht genügend zerkleinerten Brocken bilden und damit das Eindringen der Magenflüssigkeit in jene erschweren.



Der Magen und die großen Drüsen des Verdauungsapparates. a Magen, b Pförtner, c Zwölffingerdarm, d Bauchspeicheldrüse, e Leber, f Gallenblase.

Die verschiedenen Speisen verweilen 1—6 Stunden im Magen a, je nach dem sie leichter oder schwerer von dem Magensaft aufgelöst werden. Dann erst verlassen sie den Magen durch den sogenannten **Pförtner** b, eine ganz eigenartige Ventilvorrichtung, die nur gelöste oder sehr fein verteilte Stoffe durchläßt. Der Pförtner ist im Prinzip so eingerichtet wie die Augenpupille, die auf Lichtreize sich schließt; sowie den Pförtner ein harter Gegenstand berührt, zieht sich sein ringförmiger Muskel zusammen und läßt ihn nicht durch. Nach einiger Zeit öffnet der Pförtner sich wieder von selbst, und durch die wurmförmig fortschreitenden (peristaltischen) Bewegungen des Magens werden nun die verdauten Teile hindurch gedrängt, zunächst in den **Zwölffingerdarm** c. Der hier eintretende Inhalt ist schon wesentlich einheitlicher zusammengesetzt als die ursprünglich aufgenommenen Speisen. Die Stärke ist in Zucker verwandelt, das Eiweiß in seinen verschiedenen Formen hat sich mit dem Pepsin zu „Peptonen" verbunden, die später im Körper das Eiweiß wieder abgeben, mit dem sie die fleischigen Gewebe oder die leimigen Substanzen zur Bildung von Knochen, Sehnen u. s. w. bilden. Endlich ist das Fett in kleine Kügelchen zerteilt. Nur die gröber verteilte Zellulose, das holzige Fasergeflecht, die dicken Schalen der Hülsenfrüchte, widerstehen allen Verdauungssäften, wenigstens

des menschlichen Körpers, und gelangen mit dem Fett gleichfalls unverdaut in den Darm. Einige Tierarten können allerdings selbst Holz verdauen, das, wie wir wissen, ja nur eine Modifikation der Stärke ist.

Nahe unterhalb des Pförtners ergießen sich in den Zwölffingerdarm wieder Verdauungssäfte anderer Zusammensetzung als die bisher genannten und mischen sich unter seinen Inhalt, der **Bauchspeichel** oder **Pankreassaft** und die **Galle**. Der erstere wird in der **Bauchspeicheldrüse** d (s. die Abbildung, S. 615), die andere in der **Leber** e erzeugt. Für die Galle dient die **Gallenblase** f als Reservoir. Sie mischt sich kurz vor dem Eintritt in den Darm mit dem Pankreassaft, so daß beide durch eine gemeinsame Öffnung in den Darm gelangen. Zu diesen beiden Verdauungsflüssigkeiten tritt, nachdem der weiter zu verdauende Brei aus dem Zwölffingerdarm in den Dünndarm (s. die Abbildung, S. 614) gelangt ist, noch der von diesem abgesonderte Darmsaft. Alle diese Flüssigkeiten sind im Gegensatz zu den vom Magen abgegebenen alkalisch reagierend und neutralisieren wieder den in den Zwölffingerdarm sauer gelangenden Darminhalt.



Schnitt durch die Darmzotten des Dünndarms. z Darmzotten, e Blutgefäße, f Lymphgefäße, a Drüsenöffnungen, m Muskelsubstanz, l Chylusgefäße. Vgl. Text, S. 617.

Der **Pankreassaft** erweist sich als ein fast alle Speisestoffe lösender Universalverdauungssaft. Es ist eine dickschleimige, wasserhelle Flüssigkeit, die im Vergleich zu den anderen Verdauungssäften sehr viel anorganische Substanzen (Mineralsalze) enthält. Auch er ist mit Fermenten erfüllt, deren man zwei verschiedene unterscheidet, ein in ähnlicher Weise wie der Mundspeichel aus Stärke Zucker bildendes Ferment und ein anderes, das **Trypsin**, welches auch das Eiweiß löslich macht, ohne, wie der Magensaft, dazu einer Säure zu bedürfen. Auch bereitet der Pankreassaft die Fette zur weiteren Verdauung vor. In seiner chemischen Zusammensetzung hat er Ähnlichkeit mit dem Blutserum.

Von allen Verdauungssäften ist die **Galle** wohl der bekannteste. Sie zeigt nur eine schwache alkalische Reaktion und ihr intensiv bitterer Geschmack ist sprichwörtlich. Zum großen Teil besteht sie aus der Verbindung des Natriums mit Säuren; ihre braungrüne Farbe hat sie von einer Eisenverbindung. Sie greift namentlich die Fette an und gibt ihnen mit dem Darmsaft eine so untermikroskopisch feine Verteilung, daß sie die Darmwände durchdringen und zu den übrigen Körpersäften gelangen können.

Der lange, als eigentliches „Gedärm" den Bauch erfüllende **Dünndarm** ist innen mit unzähligen feinen Darmzotten sammetartig ausgepolstert, zwischen denen nun der mit den verschiedenen Verdauungsflüssigkeiten durchtränkte Darminhalt zuerst einer wirklichen kapillaren Wirkung ausgesetzt wird. Hier erst, im Dünndarm, ist der Sitz der eigentlichen **vollständigen Verdauung**, während die Tätigkeit der **anderen Verdauungsorgane** streng genommen **nur eine vorbereitende war**. Unter Umständen ist der Dünndarm im stande, die alleinige Ernährung des Körpers zu übernehmen, wenn man die Nahrungsflüssigkeit durch den After einführt.

Es ist eine durchaus irrige Meinung, daß der Magen das hauptsächlichste Verdauungsorgan sei, und man hat in neuerer Zeit mit Erfolg kranke Magen operativ entfernt, worauf der wieder zusammengeheilte Verdauungskanal auch ohne Magen in gewöhnlicher Weise das Verdauungsgeschäft übernahm, bis durch langsame Erweiterung der Speiseröhre sich ein neuer Magen bildete.

Der Dünndarm hat mit dem sich ihm anschließenden Dickdarm das doppelte Geschäft, die Verdauung zu vollenden und den fertig zubereiteten Saft von den unverdaulichen Resten abzusondern, welche dann durch den Mastdarm den Körper verlassen. Beide Vorgänge geschehen in den Darmzotten (s. die Abbildung, S. 616). Mit außerordentlich feinen Äderchen c, die sich im ganzen Körper verbreiten, saugen die Lymphgefäße f, nachdem durch ein aus den Drüsenöffnungen a fließendes Sekret die Verdauung beendet ist, den Nährsaft aus den Wandungen der Darmzotten z auf, nicht unähnlich wie die Wurzel einer Pflanze ihre Nahrung aus dem Boden entnimmt. Dieser Nährsaft ist Milch. Alle aufgenommenen Nahrungsmittel werden also durch den auflösenden und auswählenden Vorgang der Verdauung in nur diesen einen Saft verwandelt, der alles enthält, was zur Ernährung des Körpers nötig ist. Milch ist im wesentlichen nicht anders zusammengesetzt wie Blut, nur enthält sie mehr Fett, und es fehlen ihr die roten Blutkörperchen, welche dem Blut seine Farbe geben.



Lymphgefäßstämme im Unterleib und der Brust des Menschen. a Milchbrustgang. Nach Ranke, „Der Mensch".

Das feine Wurzelgewebe des Lymphgefäßsystems (s. die nebenstehende Abbildung) verbreitet sich über sämtliche Körperteile und entzieht diesen ebenso wie den Darmwänden allen Nährstoff, der durch allzu reichliche Zufuhr durch die Blutgefäße an den verschiedensten Körperstellen augenblicklich unnötig geworden ist, um ihn dem Blutkreislauf wieder zuzuführen. Das Lymphgefäßsystem ist die allgemeine Sammelstelle für alle noch brauchbaren flüssigen Abfälle und nimmt zugleich den Ersatz der verbrauchten Substanz aus der Verdauungstätigkeit mit auf. Die Gefäße vereinigen sich zu einem Hauptstrang, der hinter der Wirbelsäule aufsteigt, dem Milchbrustgang (a der Abbildung). Der in ihn aus den Chylusgefäßen des Darmes (l der Abbildung, S. 616) einströmende Milchsaft (Chylus) ist wesentlich fetthaltiger (rahmähnlich), als die aus den übrigen Körperteilen gesammelte Lymphe, die wasserhell ist. Eine Verzweigung des Milchbrustganges führt zu den Brustwarzen und gibt der Mutter die Möglichkeit, ihrem neugeborenen Kinde, das sie vorher direkt mit ihrem Blut ernährte, nun die diesem so sehr ähnliche Milch darzubieten, die den eben erst in Tätigkeit tretenden Verdauungsorganen des Kindes von aller Nahrung am wenigsten zu tun geben. Der Hauptstrom der Lymphe ergießt sich nahe vor der Stelle, wo das aus dem Körper zurückkommende Blut wieder durch die Hauptvene ins Herz gelangt, in die Blutbahn. Nun erst ist die verdaute Nahrung ihrer Aufgabe zugeführt.

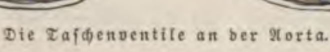
Es ist wichtig, den Wandlungen des Stoffes durch den **Blutkreislauf** weiter zu folgen, der die Ernährung aller Teile des Organismus direkt übernimmt, wofür ihm durch die Lymphe Ersatz gegeben wird. Aber der tierische Körper verlangt nicht nur ernährt zu werden wie der der Pflanze, er braucht auch die Entwickelung von lebendiger Kraft zu seiner Fortbewegung und den übrigen kraftverbrauchenden tierischen Funktionen. Dazu ist eine reichliche Verbrennung **von Sauerstoff** unbedingt erforderlich, die wir bei den bisher an der Verdauung tätigen chemischen Reaktionen nicht wahrnahmen. Die Neutralisierung des saueren Magensaftes im Darm kann hier nicht in Betracht kommen. Diese Aufgabe der Sauerstoffaufnahme und Verbrennung übernimmt das Blut wenigstens mittelbar durch den Atmungsprozeß. Es hat deshalb seine doppelte Aufgabe nicht wie die Verdauung nur zeitweilig, sondern unausgesetzt zu erfüllen. Um alle Organe ernähren zu können, muß sich demnach die Blutbahn in alle Teile des Körpers ausdehnen; und damit das Blut in alle feinsten Poren eindringen kann, wird es unter erhöhtem Druck durch die notwendigen Haarröhrchensysteme geführt. Da das Blut außer den eigentlichen Nahrungsstoffen auch in den verschiedensten Organen Sauerstoff abzugeben hat, muß es einen Ersatz dafür finden, der ihm durch die Atmung in den Lungen geleistet wird. Diesen Aufgaben und Bedürfnissen entsprechend, verstehen wir nun die Einrichtung des Blutkreislaufes ohne weiteres.



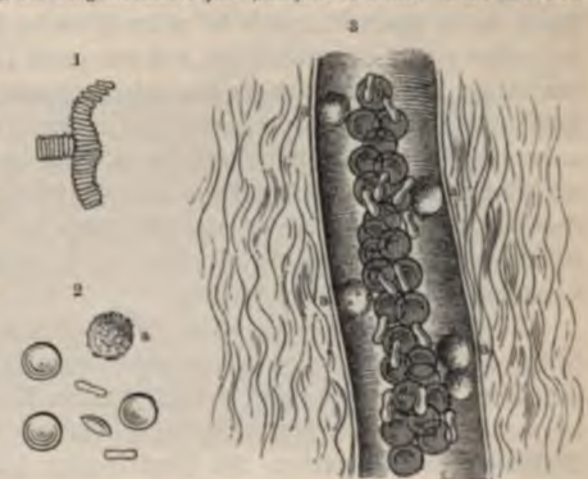
Schema des Blutkreislaufes. a linke Vorkammer, b linke Herzkammer, c Hauptschlagader, k Arterien, v Venen, e rechte Vorkammer, f rechte Herzkammer, g Lungen.

Das **Herz** ist der Druckapparat, der den Kreislauf veranlaßt. Mit seinen vier Kammern bildet es eine vollkommene Pumpstation, wie sie als Teil unserer Maschinen vielfach nachgeahmt worden ist, und ist, wenn wir von dem Nervenreiz, welcher die Kraft für seine Bewegungen auslöst, absehen, das einfachste und in seinen Wirkungen durchsichtigste, rein mechanisch arbeitende Organ. Um den Kreislauf zu verfolgen (s. die obenstehende Abbildung), beginnen wir mit dem Augenblick, in dem sich alles Blut in der **linken Hauptkammer** des Herzens b befindet; hierher ist es in frischem Zustand gekommen. Durch eine Zusammenziehung der Muskeln des Herzbeutels öffnet sich ein **Taschenventil**, das im Prinzip nicht anders eingerichtet ist, wie die gewöhnlichen Pumpenventile, nur besteht es aus Hautklappen, wie die nebenstehende Abbildung zeigt. Durch dieses Ventil strömt das frische Blut in die **Hauptschlagader, Aorta** (c der oberen Abbildung), während sich gleichzeitig ein zweites, nur durch seine Lage umgekehrt wirkendes, in die linke Vorkammer führendes Ventil schließt, so daß in diese bei der Zusammenziehung des Herzens kein Blut zurückfließen kann. Sämtliche Organe werden nun durch das, in der oberen Abbildung schematisch dargestellte, verzweigte Adersystem der **Arterien** (k) mit **frischem, hellrotem Blute** versehen. Nachdem es seine Arbeit geleistet hat, kehrt es, **blaurot** geworden, durch ein ebenso verzweigtes **Blutvenensystem** v zum Herzen zurück,




Die Taschenventile an der Aorta.

und zwar zunächst in die rechte Vorkammer e. Wir haben uns indes den Vorgang nicht etwa so vorzustellen, daß zwischen einem und dem nächsten Pulsschlag alles Blut alle die feinen Adern durchläuft. Nur die Hauptmasse des Blutes durchströmt so schnell die größeren Gefäße; in den kleineren bewegt sich das Blut viel langsamer und kehrt erst nach längerer Zeit in eine der Hauptadern zurück, wo die ihres Sauerstoffes beraubten Blutteilchen vom großen Strome mitgerissen werden. Die einzelnen Blutteilchen haben also in den Zellgeweben alle Zeit, ihre verschiedenen mechanischen und chemischen Tätigkeiten zu üben. Von der rechten Vorkammer kann das Blut in die rechte Hauptkammer durch ein Ventil gelangen, wenn das Herz sich nicht zusammenzieht. Geschieht dies aber, so schließt sich das Ventil nach der Vorkammer, und ein anderes öffnet dem venösen, verbrauchten Blute den Weg zu den Lungen g. Hier findet in den außerordentlich fein verzweigten Haarröhrchen fast eine direkte Berührung des Blutes mit der eingeatmeten Luft statt, so daß die Regeneration hier stattfinden kann. Das wieder frisch, hellrot gewordene Blut strömt nun aus den Lungen in die linke Vorkammer a und aus dieser, wenn sie nicht im Zusammenziehen ist, in die linke Hauptkammer b, wo beim nächsten Herzschlag der Kreislauf von neuem beginnt.



Blutkörperchen des Menschen. 1. rote, geldrollenartig geschichtet; 2. rote, von vorn und von der Seite gesehen, und ein weißes (a); 3. rote und weiße (a), in der Ader gelagert. Nach Ranke, „Der Mensch“. Vgl. auch Text, S. 622.

Die Menge des auf diese Weise durch den Körper transportierten Blutes ist ziemlich groß, sie beträgt etwa 5 kg beim erwachsenen Menschen. Die Zusammensetzung dieses eigentlichsten Lebenssaftes ist begreiflicherweise keine einfache. Einen Bestandteil, die durch die Verdauung eingeführte milchartige Lymphe, haben wir bereits kennen gelernt. Aus ihr besteht in der Hauptsache das Blutserum, d. h. die nach dem Gerinnen des Blutes übrigbleibende klare Flüssigkeit. Den für die Haupttätigkeit des Blutes, die Sauerstoffaufnahme, allein wirksamen Bestandteil bilden aber die roten Blutkörperchen, die in ungeheuern Mengen — etwa eine Viertelbillion beim erwachsenen Menschen — im Blutserum schwimmen. Zu ihnen treten noch die von den roten in ihrer Zusammensetzung und in ihrer physiologischen Funktion wesentlich verschiedenen weißen Blutkörperchen, deren Zahl sich zu denen der roten etwa wie 1 : 350 verhält, so daß also immer noch etwa 1000 Millionen im Menschen gefunden werden. Dies zusammengenommen ergibt, daß zunächst etwa 91 Prozent des Blutes aus Wasser und 9 Prozent aus festen Stoffen bestehen, von denen wieder 10 Prozent aus Eiweiß aufgebauter Faserstoff, 78 Prozent andere Eiweißstoffe, 1 Prozent Fett, 4 Prozent verschiedene organische „Extraktivstoffe“ und 7 Prozent unorganische Salze sind.

Die roten Blutkörperchen (s. die obenstehende Abbildung) sind kleine, ausgehöhlte Scheiben, die bei den Tieren verschiedene Formen haben; beim Menschen sind sie rund und haben einen Durchmesser von 0,0077 mm bei einer Dicke von etwa 0,002 mm. Sie haben keinen Kern, sind also keine eigentlichen Zellen und können sich nicht selbständig fortbewegen, sondern

schwimmen nur in der Blutströmung. Bei ihrer großen Elastizität können sie sich vermöge des Blutdruckes zwischen jede kleinste Pore drängen, indem sie sich dabei zu einem langen Faden ausziehen, nehmen aber bei wiedererlangter Freiheit ihre runde Gestalt wieder an. Man sieht, wie vortrefflich diese Blutkörperchen zu Bausteinen eingerichtet sind, die überall durchschlüpfen und sich anschmiegen können. Der Haupturſprungsort dieser wunderbaren Körperchen scheint die Leber zu sein, die ähnlich wie die Lunge einen besonderen Blutzufluß hat, der von dem nur zur Ernährung dienenden unabhängig ist. Aber die roten Blutkörperchen müssen auch sonst im Körper entstehen können. Ihre chemische Analyse ergibt in der Hauptsache Eiweiß, neben dem sich auch Eisenverbindungen finden. Diese Verbindungen sind es, welche ihre wichtigste Eigenschaft, Sauerstoff lose mit sich zu verbinden, ausüben.

Die Sauerstoffbindung geschieht überall, wo diese Körperchen mit der Luft in Berührung kommen, also nicht nur in der Lunge, sondern auch auf der ganzen Oberfläche der Haut, wo die feinen Blutgefäße bis zu den Poren der Haut emporreichen. Wir atmen zugleich mit unserer ganzen Körperoberfläche, und zwar genau so, was die chemische Umsetzung betrifft, wie mit der Lunge: es wird für den aufgenommenen Sauerstoff Kohlensäure auch von der Haut ausgeschieden. In dieser Hinsicht gleichen wir also den Pflanzen, während für die erhöhte animalische Tätigkeit ein besonderes Organ, die Lunge, außerdem nötig wurde. Es ist sehr merkwürdig, wie beim Atmungsprozeß der Pflanze sowohl wie des Tieres das Eisen eine wichtige Rolle spielt, das in den Chlorophyllkörnchen wie in den roten Blutkörperchen enthalten ist und zweifellos eine chemische Funktion erfüllt, obgleich diese bei beiden Klassen von Lebewesen im umgekehrten Sinne verläuft.

Die roten Blutkörperchen geben den aufgenommenen Sauerstoff sehr leicht wieder ab; sie sind also nur seine Träger zu den verschiedenen Organen, wo er, fester mit den dort angetroffenen Stoffen verbunden, durch Oxydation Wärme frei macht und in den Muskeln die mechanischen Kräfte hervorruft, die zu den verschiedenartigen Tätigkeiten der tierischen Maschine verbraucht werden. Die Blutkörperchen selbst bleiben bei dieser Aufgabe unverändert und können als Eiweißkörper ihre zweite Aufgabe, am Aufbau des Organismus und seiner Erhaltung sich zu beteiligen, erfüllen. Freilich ist es dann nötig, sie von gewissen Beimengungen, z. B. dem Eisen und anderen anorganischen Verbindungen, die zu ihrer Funktion als Sauerstoffträger nötig waren, zu entledigen. Dies geschieht durch dieselben Organe, welche auch die Blutreinigung von anderen schädlichen Beimengungen besorgen, einmal durch die über den ganzen Körper verteilten Schweißdrüsen und ferner durch das besondere Organ der Nieren, die im eigentlichsten Sinne Blutfilter von kapillaren Dimensionen sind. Sie lassen schädliche unorganische Stoffe und Verbindungen, die sich bei der mannigfaltigen chemischen Arbeit im Körper bilden, nicht durch und führen sie gelöst in die Harnblase ab. Bei dieser Filtrierung spielt der osmotische Druck offenbar wieder eine wichtige Rolle. Wir wissen, daß die Eiweißmoleküle im Vergleich zu allen unorganischen Molekülen einen sehr großen Durchmesser haben müssen. Dieses Verhältnis wird noch größer, wenn das Eiweiß zu gelatinieren beginnt, was durch Säuren unterstützt wird. Da der Inhalt der Nieren aber sauer reagiert, so können die für den Organismus so nützlichen Eiweißteile in den Nieren die feinen Poren der „Filter" nicht durchdringen und bleiben im Kreislauf, während die unorganischen Stoffe den Filter passieren. Zu diesen gehören Verbindungen der Phosphorsäure und der Schwefelsäure mit Kalium, Natrium, Calcium, Magnesium und Eisen, dann namentlich Kochsalz; alle diese Stoffe finden sich im Harn, in reichlichen Mengen von

Wasser gelöst, das etwa 96 Prozent der Ausscheidung ausmacht. Außerdem enthält aber der Harn auch eine organische Verbindung, den **Harnstoff**, dessen Zusammensetzung $CO(NH_2)_2$ als eine Ammoniumverbindung wir bereits kennen gelernt haben. Es ist begreiflich, daß, abgesehen von seiner Verwendung im Eiweiß, der Stickstoff im Körper auch nutzlos oder selbst schädlich auftreten wird. Das Blut kommt ja in der Lunge mit ihm beständig in Berührung und nimmt durch Diffusion ihn ebenso auf wie etwa im Freien stehendes Wasser aus der Atmosphäre, wenn auch sein Verhältnis zum Sauerstoff im Blut ein ganz anderes wird, weil dieses ja den Sauerstoff noch in besonderer Weise anzieht. Dieser Stickstoffgehalt ist im Blut unnütz und wird durch den Harn abgeführt, wenn er im Überschuß, d. h. mit einem größeren Diffusionsdruck als dem jeweiligen Atmosphärendruck, im Blut auftritt. In der Hauptsache aber ist der Stickstoffgehalt des Harns das Resultat von Eiweißzersetzungen. Den **Nieren** kommt demnach eine außerordentlich wichtige **Reinigungsarbeit** zu, durch welche giftige Stoffe aus dem Körper entfernt werden. Deshalb sind Erkrankungen der Niere immer sehr bedenklich und führen vielfach zum langsamen Zerfall des Körpers, z. B. bei der sogenannten Zuckerkrankheit, bei welcher die Nieren ihre auswählende Eigenschaft verlieren und auch nützliche Stoffe, eben den aus der Stärke erzeugten Zucker, durchlassen, wodurch dem Körper dauernd Kraft entzogen wird. Enthalten sich solche Kranke soviel, als es sonst dem Organismus nicht schadet, stärke- oder zuckerhaltiger Nahrung, halten sie sich also hauptsächlich an die eiweißhaltigen Fleischspeisen, so können sie den schädlichen Wirkungen der schlecht funktionierenden Nieren einigermaßen entgegenwirken, denn die viel größeren Eiweißmoleküle werden auch von solchen nicht so leicht durchgelassen.



Querschnitt durch die Haut der Lippe.

Die **Schweißaussonderung** durch die **Haut**, auf deren in der obenstehenden Abbildung im Querschnitt gezeigten Struktur wir nicht näher eingehen können, ist physiologisch mit der des Harnes durchaus vergleichbar, die Schweißdrüsen sind sogar den betreffenden harnaussondernden Organen in den Nieren ähnlich gebaut. Der **Schweiß** enthält gleichfalls Harnstoff und Kochsalz, außerdem eine Reihe von Fettsäuren, Propionsäure, $C_3H_6O_2$, Buttersäure, Kapronsäure, und so fort bis etwa zu der Säure $C_{10}H_{20}O_2$, der Kaprinsäure. Daher rührt der sauere Geschmack des Schweißes und sein übler Geruch. Diese Tätigkeit der Haut ist ebenso wie ihre Atmung beträchtlichen Schwankungen unterworfen, sie steigt und fällt sehr schnell nach Muskelanstrengung, wie die Lungenatmung. Unter Umständen kann man durch Schweißabsonderung in kurzer Zeit bedeutende Mengen Flüssigkeit verlieren. Ranke führt an, daß er im Lauf einer Viertelstunde im Dampfbade mehr als 1,25 kg abgenommen hatte. Wir erkennen hieraus auch, wie gesund es unter Umständen ist, einmal tüchtig zu schwitzen, weil

mit dieser erhöhten Ausdünstung eine schnellere Entfernung aller jener unnützen oder schädlichen Stoffe verbunden ist, die durch die Schweißdrüsen dem Blut entführt werden. Ein Schwitzbad bewirkt eine gründliche Blutreinigung. Anderseits kann die Unterbrechung der Hauttätigkeit tödliche Folgen haben, wie es z. B. bei Fieberanfällen beobachtet wird. Tritt beim Fieberkranken der Schweiß hervor, so ist die Gefahr meistens überwunden, denn das Blut kann sich nun auch durch die Hauttätigkeit erneuern.

Außer den roten Blutkörperchen, welche bei diesen Atmungsvorgängen als Träger dienen, bemerkt man noch sogenannte weiße oder eigentlich farblose Blutkörperchen im Blut, die ihrem ganzen Wesen nach von den roten durchaus verschieden sind und ganz anderen Zwecken dienen. Sie sind etwas größer als die roten und gewöhnlich kugelförmig (s. die Abbildung, S. 619), haben einen Kern und kennzeichnen sich dadurch als wirkliche Zellen. Ihr Inhalt ist lebendes Protoplasma, das ebenso wie die frei lebenden Protoplasmaklümpchen selbständig sogenannte Wurzelfüße ausstrecken kann, um ein in der Nähe befindliches Körnchen mit sich zu vereinigen, oder um sich fortzubewegen; kurz, das weiße Blutkörperchen ist ein selbständiges Wesen, von dem wir 1000 Millionen in unserm Körper beherbergen. Dieser Gedanke mag uns gar wunderbar vorkommen, wenn wir diese kleinen Wesen unterm Mikroskop zwischen den roten Blutkörperchen schwimmen oder Nahrung suchend umherkriechen sehen; es sind allerniedrigste Lebewesen, die unsern eigenen uns so einheitlich erscheinenden Körper zusammensetzen helfen, und auf die unser Wille doch keinerlei Einfluß hat. Aber im Grunde genommen haben wir nichts Merkwürdigeres vor uns, als jede einzelne der Milliarden von Zellen, die in einem bestimmten Stadium ihres Lebens auch einmal frei war, bis sie sich dort festsetzte, wo sie der beherbergende Organismus allein notwendig brauchte, um sie an seinem Aufbau mithelfen zu lassen. Und auch dann noch führt jede Zelle ein in vieler Hinsicht selbständiges Leben. Der Mensch ist in diesem Sinne nur eine Kolonie von unzählbaren Einzelwesen, die eine Arbeitsteilung unter sich eingeführt haben, wie in einem Staatsorganismus.

Wo die weißen Blutkörperchen im Körper entstehen, ist noch nicht ganz aufgeklärt. Ebenso wie die Leber an der Bildung der roten wesentlich beteiligt ist, scheint für die weißen die Milz das Reproduktionsorgan zu sein. Aber zum größten Teil vermehren diese selbständigen Lebewesen sich wohl aus sich selbst, wie es die freien Protoplasten durch einfache Teilung ja auch tun. Nahrung finden sie in der Eiweißlösung des Blutes mehr als genügend. Auch in der Lymphe und anderen Körpersäften findet man ähnliche weiße Protoplasmakörperchen. Ihre Tätigkeit ist eine reinigende, indem sie alle dem Blute nachteiligen Stoffe, deren sie habhaft werden, besonders kleine feste Massen, die sich eingeschlichen haben, einfach verzehren. Man hat die weißen Blutkörperchen mit den Polizeiorganen im Staate verglichen, die alles Schädliche aufzugreifen und hinwegzuführen haben, als eigentliche Eiweißzellen beteiligen sie sich aber zweifellos auch an dem organischen Aufbau des Körpers.

Neben der Ernährung des ganzen Körpers besorgt das Blut eine gleichmäßige Erwärmung. Es ist bekannt, daß die Bluttemperatur der warmblütigen Tiere nur innerhalb sehr enger Grenzen schwanken darf, ohne daß die Funktion aller Organe wesentliche Störungen erleidet, oder gar der Tod eintritt. Da wir früher erfahren haben, daß die chemischen Reaktionen in hohem Grade von der Temperatur abhängig sind, unter der sie stattfinden, so können wir von vornherein vermuten, daß dieses Erfordernis einer konstanten Temperatur für die höheren Organismen eine chemische Ursache hat. In der Tat behält das Eiweiß, der überall im tierischen Organismus wirksame Stoff, nur bei bestimmter Temperatur seine Löslichkeit, die eine

erste Bedingung für seine vielseitigen Aufgaben im Körper ist. Seine größte Beweglichkeit hat das Eiweiß etwa bei 35—40°, also der durchschnittlichen Bluttemperatur der warmblütigen Tiere; bei etwa 20° gelatiniert es und hört auf, transportfähig zu werden, von etwa 50° an dagegen gerinnt es, wie gekochte Eier zeigen, und wird dadurch zugleich unbeweglich und zersetzt sich. Das durch Kälte erstarrte (gelatinierte) Eiweiß kann durch Wärmezufuhr wieder flüssig gemacht werden, während das geronnene niemals wieder durch Wärmeentziehung in seinen früheren Zustand zurückzuführen ist. Hieraus können wir unmittelbar Schlüsse auf das Verhalten der hauptsächlich aus Eiweiß aufgebauten Organismen, also der Tiere, ziehen. Wir vermuten, und die Tatsachen bestätigen dies vollkommen, daß die **Körperwärme** eines Tieres etwa auf 20° erniedrigt werden kann, wobei es bis zur scheinbaren Leblosigkeit erstarren wird; es ist aber durch Wärmezufuhr wieder zum Leben zu erwecken, während die Erhöhung der Körpertemperatur um einen viel geringeren Betrag wesentlich gefährlicher wird. Steigt dieselbe bei Fieberkranken um 5°, also von der normalen Temperatur von 37° auf 42°, so ist bekanntlich schon große Lebensgefahr vorhanden; in sehr seltenen Fällen hat man noch bis zu 50° bei Sterbenden beobachten können. Die **Kälte** ist an sich nicht lebensgefährlich. Erstarren doch jeden Winter ungezählte Lebewesen zur völligen Regungslosigkeit, so daß alle ihre Organe ihre Tätigkeit einstellen, und doch erweckt sie die Frühlingswärme wieder zu fröhlichem Leben. Ist nur dafür gesorgt, daß die bei einer Abkühlung auf etwa 20° erstarrten Körper, die sich nun selbst nicht mehr gegen das Eindringen noch größerer Kälte schützen können, sich nicht wesentlich unter den Gefrierpunkt des Wassers weiter abkühlen, weil durch die Ausdehnung des gefrierenden Wassers die feinen Gewebe der Organe zersprengt würden, so wird die Lebenstätigkeit nur unterbrochen, aber nicht für die Folge unmöglich gemacht. Selbst beim Menschen soll es ja gelingen, wie aus Erzählungen von Fakiren hervorgeht, durch eine solche Verminderung der Körpertemperatur die Lebenstätigkeit monate- und jahrelang zu unterbrechen, ohne daß der Tod eintritt.

Die Erhaltung einer **unveränderlichen Bluttemperatur** ist also in Klimaten, die keine Temperaturen unter Null und über einigen vierzig Graden aufweisen, kein unbedingtes Erfordernis. Die sogenannten **kaltblütigen Tiere** haben immer die Körpertemperatur, welche der außen herrschenden Wärme entspricht; sie haben für die Unveränderlichkeit der Bluttemperatur unvollkommenere Reguliervorrichtungen wie die **warmblütigen**. Die in unserem Klima lebenden Reptilien müssen also im Winter erstarren; in den Tropen geschieht dies nicht, weil dort die Temperatur der Luft nur selten unter jene von einigen zwanzig Grad herabsinkt, bei der das Eiweiß erstarrt. Auch sie entwickeln natürlich durch die verschiedenen chemischen Reaktionen in ihrem Körper Eigenwärme, die sie aber bald wieder an die Umgebung abgeben. Durch diese Eigenwärme können kaltblütige Tiere, die in beständig sehr nahe bei Null Grad liegenden Temperaturen leben, wie die Tiefseegeschöpfe, ihre Organe warm genug für die Eiweißzirkulation erhalten. Diese sind also gewissermaßen als warmblütige Tiere einer tieferen Temperaturstufe anzusehen.

In denjenigen Entwickelungsperioden der organischen Welt, in denen noch keine warmblütigen Tiere auftraten, herrschte rings um die Erde eine allgemeine Temperatur, die wahrscheinlich niemals unter diejenige herabsank, bei der das Eiweiß zu erstarren beginnt. Deshalb waren damals besondere **Reguliervorrichtungen** für die Bluttemperatur noch nicht nötig. Die Lebenstätigkeit der Geschöpfe jener Zeit wurde trotzdem durch die Wärmeverhältnisse niemals unterbrochen. Als aber die klimatischen Zonen sich auf der Erdoberfläche deutlicher

abzugrenzen begannen, gewannen Geschöpfe, die sich bei beliebig innerhalb weiter Grenzen schwankender Temperatur lebensfähig erhalten konnten, über diejenigen einen gewaltigen Vorsprung, deren organische Maschinen ihre Arbeitsleistung mit der äußeren Temperatur wesentlich verringerten oder gar einstellten. Diese neue Form von Lebewesen entwickelte sich darum um so höher, je konstanter ihre Bluttemperatur derjenigen gleich blieb, welche für die Beweglichkeit und den Chemismus des Eiweißes überhaupt die besten Bedingungen bietet, denn sie konnten alle organischen Funktionen Tag und Nacht, Sommer und Winter gleichmäßig fortführen und am Aufbau und der Verbesserung des Organismus selbst beständig weiter arbeiten.

Jene **Vorrichtungen für Temperaturregulierung**, die beim Menschen am vollkommensten sind und dadurch zu seiner den ganzen Erdball beherrschenden Stellung wesentlich beigetragen haben, sind eigentlich recht einfacher Art, wenn wir vorweg feststellen, daß die Tätigkeit aller Organe von der ihnen jeweilig zuströmenden Blutmenge, ihrer Nahrung, unmittelbar abhängig ist. Zunächst muß sich eine bestimmte Durchschnittstemperatur offenbar von selbst herausbilden, denn wenn die Wärmeerzeugung im Inneren des Körpers mit seiner Wärmeabgabe durch Arbeit, Ausstrahlung u. s. w. nicht durchschnittlich Schritt hielte, würden wir ja nach kurzer Zeit entweder immer kälter oder immer wärmer und könnten nicht bestandfähig sein, ebenso wie ein Geschäft bald seine Tätigkeit einstellen müßte, bei dem die Einnahmen nicht mit Inbegriff aller auch unvorhergesehenen Verluste mindestens die Ausgaben decken. Es handelt sich also nur darum, den Schwankungen der Temperatur so zu begegnen, daß sie nur einen möglichst geringen Einfluß auf die Blutwärme ausüben. Dies gelingt dem menschlichen Körper vorzüglich. Polarfahrer sind fähig, sich monatelang in Temperaturen aufzuhalten, die gegen hundert Grad unter ihrer Blutwärme liegen, ohne daß diese durchschnittlich auch nur um einen Grad geringer würde; anderseits haben Menschen sich bis zu einer Viertelstunde Temperaturen in ganz trockener Luft aussetzen können, die über der Siedehitze liegen (s. deswegen Ranke, „Der Mensch", I, S. 343), und auch dabei nahm die Körperwärme nicht um einen Grad zu.

Als Reguliervorrichtungen, die solche Wunder leisten, dienen zunächst die ungezählten **Poren** und feinsten Äderchen der Haut, die sich, wie jeder Körper, durch die Kälte zusammenziehen und durch die Wärme ausdehnen; diese einfachen physikalischen Wirkungen werden noch durch physiologische unterstützt, indem die feinen Verzweigungen der Arterien unter der Haut von ringförmigen Muskeln umgeben sind, die auf Kälte- und Wärmereize sich noch kräftiger zusammenziehen oder ausdehnen. Durch die zusammenziehende Wirkung der Kälte wird der Körperperipherie Blut entzogen, bei Erwärmung mehr als gewöhnlich zugeführt. Dies gilt aber nur von dem arteriellen, arbeitskräftigen Blut; darum werden unsere frierenden Hände blau, weil die Haut dann fast nur noch venöses, blaues Blut enthält, dagegen rötet sich die Haut ungewöhnlich, wenn wir uns erhitzen. Bei Einwirkung von Kälte füllt also das Blut in größerer Menge die inneren Organe, die infolgedessen um so kräftiger arbeiten und namentlich Körperwärme erzeugen. In den Anfangsstadien der Kälteeinwirkung arbeitet das Herz kräftiger als bei normaler Temperatur, und die Körperwärme steigt sogar über den Mittelstand. Denn dadurch, daß das Blut der Körperoberfläche entzogen wird, wird auch die Ausstrahlung vermindert. An exponierten Körperteilen, z. B. den Fingern, wird der Wärmeverlust aber schließlich so groß werden, daß dem organischen Eiweiß seine Bewegungsfähigkeit genommen wird: die Finger werden steif, denn ihre Muskeln stellen die Tätigkeit ein. Bei fortgesetzter Kältewirkung kann auch das Blut trotz erhöhter Tätigkeit seine normale Temperatur

nicht mehr aufrecht erhalten, und nun beginnen auch die inneren Organe wegen mangelnder Erwärmung träger zu funktionieren, besonders das Herz, das langsamer und langsamer schlägt. Jetzt befindet sich der Körper auf der abschüssigen Bahn, die schnell zur völligen Erstarrung, zum Kältetod führt; denn nun umnachtet sich auch das Bewußtsein, weil das Gehirn in erster Linie zu seiner Tätigkeit einer reichlichen Blutzufuhr bedarf. Sind indes die Organe noch nicht im eigentlichen Sinne erfroren, d. h. unter Null Grad abgekühlt, so gelingt es oft, durch langsame Erwärmung und Anregung zur Atmung, indem man den Brustkasten rhythmisch zusammendrückt und sich wieder ausdehnen läßt, den Organismus, der bereits alle Funktionen eingestellt hatte, wieder zu beleben, und es zeigt sich dann, daß die Organe bei dieser Erstarrung keinerlei Schaden erlitten haben.

Zum Schutze gegen zu große Wärme bedarf der Körper keiner anderen Vorrichtungen als derer gegen die Kälte, freilich können diese bei weitem nicht so weit nach oben hin wirken wie nach unten, wofür wir den Grund vorhin angegeben haben. Öffnen sich infolge des Wärmereizes die Hautadern, so strömt in sie Blut aus dem Körper; damit wird die Ausstrahlung vermehrt, und die Tätigkeit der inneren wärmeerzeugenden Organe wird wegen geringeren Blutgehaltes vermindert, während durch den größeren Blutinhalt der Haut deren Organe wesentlich kräftiger arbeiten; die mit der Blutflüssigkeit sich strotzend füllenden Schweißdrüsen sondern ihren Saft in immer größeren Mengen ab, der auf der Haut verdunstet und dadurch Wärme bindet, und die Verdunstungskälte hält das Eindringen der äußeren Wärme in die Haut solange ab, wie diese feucht bleibt, d. h. noch Schweiß absondert. In trockener Luft können wir größere Hitzegrade ertragen als in feuchter, weil in letzterer die Verdunstung geringer ist. Darum sind auch in den Tropen die feuchten Küstendistrikte oft so unerträglich für den Europäer, der hier zu Fiebern neigt, während im Inneren des Landes die gleichen Hitzegrade ohne nachteilige Wirkung ertragen werden. Nur die Verdunstung macht es möglich, daß man den Körper Temperaturen aussetzen kann, bei denen das Eiweiß längst gerinnt, weil diese Temperaturen selbst nicht bis zur Haut vordringen können, wenn sie mit Schweiß bedeckt ist. Da dieser aber nicht fortwährend entwickelt werden kann, ohne dem Blute wichtige Teile zu entziehen, wird immer eine erhöhte Temperatur dem Körper wesentlich gefährlicher sein als eine erniedrigte.

Die Wärmeerzeugung findet im Körper in allen Organen statt, in denen chemische Umsetzungen durch Oxydation geschehen, die, wie wir sehen werden, in allen Bindegeweben und Muskeln während deren Tätigkeit auftritt. Hauptsächlich aber wird Wärme in der Leber hervorgebracht, dem eigentlichen chemischen Laboratorium des Körpers. Durch die Menge der Nahrungszufuhr wird dafür gesorgt, daß die Wärmeerzeugung nicht zu gering wird. Ein Übermaß reguliert sich wieder durch die Organe selbst, indem ein zu heiß werdendes Organ seinen Eiweißgehalt zersetzt und dadurch in entsprechendem Maße seine Tätigkeit, d. h. seine Wärmeerzeugung, einstellt.

Ein erwachsener menschlicher Körper erzeugt in unserem Klima nach Helmholtz etwa 2700 Kalorien (große Wärmeeinheiten) in 24 Stunden, das ist ungefähr so viel, als 0,7 kg gutes Holz oder 0,5 kg Steinkohlen bei ihrer Verbrennung freimachen. Hierbei ist diejenige Wärmemenge nicht eingerechnet, die sogleich wieder innerhalb des Körpers zur Bewegung der inneren Organe, namentlich des Herzens, verwendet wird. Diese Arbeit ist eine sehr beträchtliche, und Ranke rechnet aus, daß sie in 24 Stunden nicht weniger als 87,000 kgm beträgt, daß man also mit der Kraft des Herzens innerhalb dieser Zeit 87,000 kg um einen

Meter heben könnte. Vergleicht man diese Leistung mit der eines Arbeiters, so findet man, daß sie mehr als den vierten Teil seiner angestrengtesten Tätigkeit während eines achtstündigen Arbeitstages beträgt. Die Herzarbeit verbraucht etwa 200 große Wärmeeinheiten in 24 Stunden. Von jenen 2700 Kalorien werden gegen 1000 zur Erwärmung der eingeführten Speisen und der eingeatmeten Luft, ferner bei der Wasserverdunstung in den Lungen und auf der Haut verbraucht. Von den übrigbleibenden 1700 Kalorien geht weiter durch Ausstrahlung des ja immer gegen die Umgebung wärmeren Körpers eine beträchtliche Menge Wärme verloren, die wegen der wechselnden äußeren Umstände schwer zu berechnen ist, und es bleiben unter normalen Umständen in unserem Klima etwa noch 800—1000 Kalorien übrig, die der Mensch nach seinem Belieben verwenden kann. Wäre unser Organismus nur dazu bestimmt, solche Arbeit nach außen zu leisten, wären wir bloße Arbeitsmaschinen, so dürfte man diese wenigstens theoretisch als unökonomisch bezeichnen, da kaum der dritte Teil der in ihnen frei werdenden Wärmemenge zur Arbeitsleistung verwendbar wird. Tatsächlich machen unsere modernen Dampfmaschinen den menschlichen große Konkurrenz. Dennoch ist seitdem der Gebrauch an Menschenkraft kein geringerer geworden, denn es gibt immer ein unerschöpfliches Feld von Tätigkeiten, die eine leblose Maschine niemals ausführen kann. Die Vervollkommnung unserer leblosen Maschinen drängt die Menschheit mit unwiderstehlicher Gewalt in immer höher liegende, immer mehr Intelligenz erfordernde Tätigkeitsgebiete, sie führen die Menschheit zur Veredelung, wie wenig das auch im gegenwärtigen Übergangsstadium dieser neuen Entwickelung hervortreten mag. Der Menschheit wird mehr und mehr die rohe erniedrigende Last der rein mechanischen Arbeit von den Schultern genommen. Es ist deshalb eine der höchsten Aufgaben der Leiter einer modernen Kulturentwickelung, um die entstandenen Schwierigkeiten der Übergangsperiode am sichersten auszugleichen, die großen Massen, die bisher nur als keuchende Maschinen verwendet wurden, zu einer höheren Bildungsstufe emporzuheben und ihnen den Eintritt in höhere Arbeitsgebiete zu ermöglichen, damit für sie unsere Maschinen keine Konkurrenz mehr sind.

Die Verhältnisse der Wärmeerzeugung und des Wärmeverbrauchs werden in den extremen Zonen natürlich wesentlich andere. In den Tropen wird z. B. sehr viel weniger, in der kalten Zone viel mehr Wärme vom Körper ausgestrahlt wie in unserm gemäßigten Klima. Dementsprechend hat die Nahrungsaufnahme in den Tropen nur für einen täglichen Verlust von etwa 1800 Wärmeeinheiten, in der kalten Zone dagegen für einen solchen von 4500 zu sorgen; deren Bewohner müssen fast noch einmal soviel kohlenstoffreiche Nahrung zu sich nehmen wie die der Tropen. Daher kommt die Vorliebe der Bewohner des hohen Nordens für Fette, die von allen Nahrungsmitteln am meisten Kohlenstoff enthalten und die Verbrennung im Körper am meisten unterstützen.

Durch die reichlichere Nahrungsaufnahme in kalten Klimaten wird nicht nur der größere Wärmeverlust gegenüber den heißen Klimaten gedeckt, sondern die Arbeitsfähigkeit, also der Überschuß an Kraft, der frei verwendet werden kann, ist in den kälteren Gegenden, wenn man von Extremen absieht, auch größer als in den wärmeren, wo der Mensch zu erschlaffen beginnt. Wir sind, wie aus unseren früheren Betrachtungen über den Einfluß der Temperatur auf den Chemismus des Eiweiß (S. 623) schon hervorging, widerstandsfähiger gegen Kälte als gegen Hitze.

Deshalb verfolgen wir in unserer Kulturentwickelung einen deutlichen Zug nach Norden im Laufe der Jahrhunderte. In den vorgeschichtlichen Zeiten lag der Höhepunkt der

Kulturentwickelung noch etwa an der Grenze der heißen und der gemäßigten Zone, im alten Ägypten. Er wanderte dann von Alexandrien nach Babylon und Athen, von dort nach dem wieder etwas nördlicher gelegenen Rom und endlich über Spanien, Frankreich, Großbritannien immer weiter dem Pol zu. Es war wohl ganz natürlich, daß die ersten Regungen der Intelligenz sich dort zeigten, wo dem menschgewordenen Tier die Natur noch alles in den Schoß warf, wo es nur spielend die ersten Geistesfunken zu entwickeln brauchte. Als dann aber der Kampf ums Dasein begann und die Leistungsfähigsten auswählte, zeigte es sich, daß diejenigen einen wesentlichen Vorteil hatten, die ein kälteres Klima vertrugen, denn die größere Wärmeausgabe ließ sich immer durch Nahrungsaufnahme kompensieren; nicht aber konnte der Körper ohne größere Verluste, also allgemeine Herabminderung der Leistungsfähigkeit, gegen die allzu große Hitze ankämpfen. Die Frage der **Anpassung an kältere Klimate** ist also im wesentlichen eine **Nahrungsfrage**. Darum ist auch dem weiteren Vordringen der Kultur nach Norden hin dadurch eine Grenze gesetzt, daß die Natur in diesen Gebieten beginnt, mit der Darreichung der Nahrungsmittel immer karger zu werden. Ist aber einmal die Aufgabe, die Nahrungsmittel sehr billig, z. B. Brot aus Holz herzustellen, gelöst, so wird die Menschheit ihren Eroberungszug nach Norden wieder mit erhöhter Kraft fortzusetzen im stande sein, obschon auch dort selbstverständlich durch die Unwirtlichkeit der Natur schließlich eine Grenze gesteckt wird.



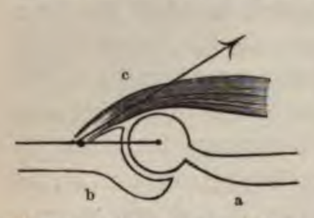
Der Bizeps. a gestreckt, b kugelig zusammengezogen. Nach Ranke, „Der Mensch".

Die willkürliche Leistung mechanischer Arbeit, die, vom Geiste geleitet, unserer Kulturarbeit zu Grunde liegt, wird von den **Muskeln** besorgt, die die eigentlichen Arbeitsmaschinen des tierischen Körpers sind. Das mechanische Prinzip ihrer Wirkungsweise ist das denkbar einfachste: Alle Muskeln können weiter nichts tun als sich **zusammenziehen** und wieder **ausdehnen**. Unsere obenstehende Zeichnung veranschaulicht den bekannten Bizepsmuskel, dessen Lage am Oberarm wohl jeder kennt, und der die Aufgabe hat, den Unterarm im Ellbogengelenk zu drehen. Wir sehen den Muskel einmal gestreckt, das andere Mal kugelig zusammengezogen, wodurch er sich entsprechend verkürzt. Von den beiden Enden eines Muskels ist immer das eine an einer Stelle befestigt, die bei dem Zug während der Verkürzung nicht nachgeben kann, der Bizeps z. B. oben am Kugelgelenk des Oberarmes, wo er fest an der Schulter sitzt. Das andere Ende des Muskels dagegen ist an dem zu bewegenden Knochen befestigt. Bei der Verkürzung des Muskels wird der Knochen in seinem Kugelgelenk gedreht, soweit seine Kraft oder die Form der betreffenden Knochenteile es gestatten. In der folgenden Zeichnung (S. 628 oben) sieht man, wie der Bizeps c um die Kugel des Oberarmbeins a am Ellbogen herumgeführt ist, damit er auch den ganz ausgestreckten Arm umzubiegen vermag. Ferner ist ersichtlich, wie ein Ansatz am Unterarmknochen b seinem Zurückfallen nach hinten eine Grenze setzt. Diese und ähnliche Vorrichtungen am Skelett und den Muskeln sind mechanisch unmittelbar verständlich.

Die Zusammenziehung des Muskels geschieht infolge eines **Nervenreizes**. In jedem Muskel endigt ein Nerv, der zwischen ihm und dem Gehirn und dem Rückenmark eine leitende Verbindung herstellt. Der Nervenreiz selbst scheint in einem sehr schwachen elektrischen

Strome zu bestehen, der in dem Muskel zweifellos eine chemische Reaktion auslöst. Wie aber die augenblickliche, oft sehr bedeutende Kraftäußerung des Muskels daraus entsteht, ist mechanisch noch unaufgeklärt.

Die **Muskelsubstanz** besteht aus einem Fasergewebe aus Eiweißstoff, das bei den willkürlich zu bewegenden Muskeln eine feine **Querstreifung** zeigt (s. die untere Abbildung). Letztere wird durch sehr kleine Partikelchen gebildet, die in dem Gewebe eingebettet sind. Die helle und die dunklere Substanz der Muskelfasern haben verschiedene Eigenschaften, die namentlich in ihrem optischen Verhalten hervortritt, indem die dunkle doppeltbrechend, die andere nur einfach brechend ist. Nach den Grundanschauungen über die Einheitlichkeit der Wirkungen, die, wie die optische und die elektrische, von den Ätherwellen verursacht werden, ist es keinem Zweifel unterlegen, daß die graue und die farblose Substanz der Muskelfasern wegen ihrer verschiedenen optischen auch verschiedene elektrische Eigenschaften haben muß. Ist nun der Nervenreiz ein elektrischer, so dürfen wir vielleicht annehmen, daß die Zusammenziehung der willkürlich beweglichen Muskeln durch eine gegenseitige elektrische Anziehung der grauen Partikelchen der Querstreifung hervorgebracht wird. Freilich fehlen, soviel wir noch sehen können, diese Streifen den von unserer Willkür unabhängig arbeitenden Muskeln, namentlich denen des Herzens; auch Übergänge aus der einen in die andere Form sind nachgewiesen worden.



Ansatz des Bizeps im Ellbogengelenk. Vgl. Text, S. 627.

Die Muskeln sind außerordentlich elastisch. Sobald der Nervenreiz aufhört, dehnen sie sich von selbst wieder aus und erleichtern dadurch dem Körper seine Arbeit wesentlich.

Durch welche molekularen Wirkungen nun auch die Zusammenziehung der Muskeln erfolgen mag, immer muß die geleistete Arbeit sich schließlich im Körper als eine **chemische Reaktion** offenbaren, weil er für die vom Muskel geleistete Arbeit oder, was dasselbe besagt, für den dadurch verursachten Wärmeverlust nur durch chemische Arbeit Ersatz schaffen kann. Es konnte auch experimentell nachgewiesen werden, daß der im ruhenden Zustand alkalisch oder neutral reagierende Muskel nach seiner Tätigkeit sauer wird, daß also mit der geleisteten Arbeit in der Tat ein **Oxydationsprozeß** parallel geht. Alle Muskeln sind von außerordentlich feinen Blutgefäßen durchzogen, die ihnen immer frisches Blut zuführen, und zwar in um so reichlicherer Menge, je mehr sie in Tätigkeit gewesen sind. Das Blut entführt die Oxydationsprodukte der Muskeln, die sogenannte **Fleischmilchsäure**, die der gewöhnlichen Milchsäure ähnlich ist; es wäscht den Muskel aus und führt ihm zugleich frischen Nährstoff zu.


Querstreifung der Muskelfasern. Nach Ranke, „Der Mensch".

Muß ein Muskel andauernd arbeiten, so kann die Blutzirkulation mit der Abführung der Fleischmilchsäure nicht Schritt halten: der **Ermüdungsstoff** sammelt sich im Muskel an und macht ihn immer weniger arbeitsfähig. Nachdem man ihm aber einige Zeit Ruhe läßt, wird das Blut den Muskel wieder allmählich „auswaschen", vom Ermüdungsstoff befreien, worauf er seine frühere Kraft wieder gewinnt. Vielleicht wird man einmal den Muskel mit einem elektrischen Akkumulator vergleichen können, der durch den Blutstrom langsam geladen und dessen mit diesem aufgespeicherte Energie durch den Nervenreiz nach Bedarf benutzt wird.

In engster Beziehung zu den Muskeln stehen die **Knochen**, die sie zu bewegen haben. Jeder Querschnitt durch einen Knochen zeigt, daß er keine leblose Masse ist, denn er ist von zahlreichen Kanälen durchzogen, die ihm Blut zu seinem Wachstum oder seiner Erhaltung zuführen, denn auch der Knochen erneuert fortdauernd teilweise seine Substanz. Auch die **Nerven** werden in ihnen geleitet, denen damit eine besonders geschützte Lage gegeben wird (s. die untenstehende Abbildung). So beherbergt das Innere der Wirbelsäule das **Rückenmark**, jenen vielverzweigten Nervenapparat, der die unwillkürlichen und sogenannten **reflektorischen Bewegungen** reguliert. Auch die Knochen sind sehr vielartig zusammengesetzte organische Teile des Menschenleibes, und ihre Einrichtungen zur Ausführung ihrer vielseitigen Tätigkeit sind bewundernswert. Wir können uns an dieser Stelle nicht weiter mit ihnen befassen, obgleich manche interessante Anwendung der reinen Mechanik dabei erläutert werden könnte. Die chemische Zusammensetzung der Knochen besteht aus verschiedenen Kalkverbindungen, in der Hauptsache phosphorsaurem Kalk; man kann aber auch kohlensauren Kalk sowie Fluor- und Chlorkalk in sehr geringen Mengen, endlich phosphorsaure Magnesia in ihnen nachweisen. Die bindende Substanz ist die leimbildende Modifikation des Eiweiß. Aus ihr werden zunächst die **Knorpel** gebildet, die noch weich und biegsam sind und sich beim Menschen teilweise erst nach den ersten Lebensjahren zu der harten Knochensubstanz verdichten. Jeder Knochen ist von der **Knochenhaut** umgeben, durch deren Ausscheidungen das Wachstum auch des schon festen Knochens ermöglicht wird. Die Knochen sind untereinander bei den Gelenken durch **Sehnen** verbunden, wenig elastischen Bändern, die den Muskeln die Arbeit ersparen, das Gewicht der Knochen im ruhenden Zustand zu tragen. In welchem Sinne hier auch der Luftdruck arbeitsparend verwendet wird, wurde schon S. 112 erörtert.



Knochen-Querschnitt. a Kanäle.

Über diesem ganzen in seinen großen Zügen hier geschilderten Arbeitsorganismus des Menschen steht das ihn leitende und seinerseits wieder von der Außenwelt beeinflußte **Nervensystem**. Es ist ein bis auf seine Ernährung von dem allgemeinen Blutstrom unabhängiger Organismus, der den Körper mit allerfeinsten Fasern in allen seinen Teilen durchdringt. Seine Einrichtung, von der die Aufnahme und Verarbeitung all unseres Wissens, also auch des in diesem Werk behandelten, abhängt, haben wir schon in der Einleitung etwas ausführlicher besprochen, weil die Kenntnis seiner Tätigkeit uns die Gewähr leisten mußte, inwieweit die durch das Nervensystem aufgenommenen Erfahrungen Richtigkeit haben. Wir können deshalb auf diese einleitenden Betrachtungen verweisen und fügen nur folgendes ergänzend hinzu.

Die **graue** und die **weiße Nervensubstanz**, die **Nervenzellen** und die **Nervenfasern** haben im wesentlichen die gleiche chemische Zusammensetzung. Es erscheinen nur die verschiedenen, überall darin auftretenden Bestandteile verschieden gemischt. In der Hauptsache sehen wir wieder, neben 84—70 Prozent Wasser, Eiweißstoffe auftreten, dann einen dem Nervensystem eigenen Stoff, das Protagon (Liebreich). Dieser Stoff läßt sich in jedem Protoplasma nachweisen, jenem chemischen Proteuswesen, aus dem geradezu alle Substanzen abzuscheiden sind, die ein lebender Organismus aufweist. Aus dem Protagon bilden sich zweifellos erst nach dem Ableben die in der Hirnsubstanz gefundenen Produkte Lezithin, Cholesterin und Zerebrin, die alle einen ziemlich großen Phosphorgehalt zeigen.

In der Nervensubstanz findet man ebenso wie in den Muskeln nach anstrengender Nerventätigkeit den schon erwähnten „Ermüdungsstoff", und ebenso atmen die Nerven dann durch

das Blut Kohlensäure aus. Die hier vorgehenden Reaktionen, mögen sie nun rein chemischer oder zum Teil auch elektrischer Natur sein, sind also die gleichen wie die durch sie ausgelösten Vorgänge in den Muskeln. Auch in den Nerven wird der Ermüdungsstoff vom Blut allmählich wieder weggewaschen, namentlich während des Schlafes, nach welchem unsere gereinigte Gehirnsubstanz wieder mit neuer Frische aufnahme- und arbeitsfähig wird.

Mit der geistigen Arbeit ist also ebenso eine Oxydation, eine Wärmeausgabe, ein Verlust an verfügbarer Arbeitskraft des Organismus verbunden, wie mit der körperlichen Arbeit. Es ist allerdings nicht möglich, die äußere Arbeit der Nerven, die die Reize der äußeren Sinnesorgane nach dem Gehirn übertragen oder die Bewegung der Muskeln anregen, von der ausschließlich geistigen Arbeit des Denkens zu trennen. Wir wissen nicht, ob nicht auch beim bloßen Denken, bei dem weder äußere Sinnesorgane noch sonstige Körperteile irgendwelche Bewegung ausführen, im Inneren des Gehirns mechanische Arbeit geleistet wird. Man könnte sich denken, daß die Gehirnzellen, die als körperliche Repräsentanten nur ihnen eigener Gedankenverbindungen gelten, durch unsern Willen in Vibrationen geraten. Wir sind geneigt, ähnliches anzunehmen, da das bloße Denken zweifellos ermüdend, erschlaffend wirkt und ebenso wie die Tätigkeit der Muskeln durch Ruhe wieder erfrischt werden kann. Fände beim Denken keine mechanische oder molekulare Arbeit statt, so wäre es ein außerhalb der Grenzen der Materiewirkungen stehender transzendentaler Akt. Es wird von vielen Forschern behauptet, daß die Denkfähigkeit an sich niemals ermüdet, und wir selbst im Schlaf ununterbrochen weiter denken. Nur schwankt die Fähigkeit, das Gedachte zum Bewußtsein zu bringen. Dieses Bewußtwerden wäre also erst ein materieller Akt unseres Organismus, nicht der Gedanke an sich. Hier aber stehen wir an der Schwelle unserer Forschungsfähigkeit, denn diese kann sich nur auf materielle Vorgänge erstrecken.

Durch das Nervensystem steht der unergründlich wunderbare Organismus unseres Körpers, dessen Hauptzüge wir hier zu überblicken versuchten, mit der Außenwelt in unendlich ausgedehnten Beziehungen. Bedenken wir, daß die Ätherwellen, welche von den Sternen des Firmamentes her unsere Netzhaut treffen, von Materieanhäufungen in ganz bestimmter Weise beeinflußt worden sind, die sich in unausdenklichen und unausmeßbar großen Entfernungen von uns bewegen, so erkennen wir, daß uns ein materielles Band mit allen diesen Welten verbindet, von denen wir selbst ein Teil sind, wie eine Zelle unseres Organismus ein Teil von uns; denn eine unsichtbar kleine Zelle unserer Fingerspitze hängt von einer ebenso unsichtbar kleinen Zelle in unserem Gehirn ab, und diese wieder ist in geringerem oder höherem Maße von allen Teilen unseres Körpers abhängig. Wir dürfen die in die äußeren Sinnesorgane mündenden winzigen Nervenfäserchen durchaus vergleichen mit den Wurzelfäserchen einer Pflanze, die aus ihrer Umgebung sich Nahrung in allerfeinster Zerteilung holt und sie in den inneren Organen sammelt und verarbeitet. So sammeln und verarbeiten wir die von außen uns umwogenden Materiebewegungen, die wir als Sinneseindrücke in unser Inneres aufsaugen, zu einem Ganzen, das ebenso wie die körperliche Nahrung bei seiner Aufnahme in andere Formen gebracht werden muß, um zu dem Zentralorgan der Verarbeitung der geistigen Nahrung geleitet zu werden, wo es wieder zusammengefügt wird, ebenso wie die Verdauungsorgane die unlöslichen Nahrungsstoffe erst lösbar machen und wieder im Körper in unlösliche Stoffe zum besten von Muskelfaser, Fleisch, Fett, Nervensubstanz u. s. f. umwandeln.

In besonders enge Beziehung tritt der Mensch durch sein Nervensystem mit dem Menschen, wie überall das Gleiche sich mit dem Gleichen am leichtesten zusammenfindet; es ist

dies ein allgemeiner Zug, den wir schon in der toten Natur, bei den naszierenden chemischen Verbindungen und besonders beim Kristallisationsprozeß deutlich ausgesprochen finden, und der sich wenigstens in diesen unteren Stadien der Materiegruppierungen einfach mechanisch erklären läßt. Die Nervensysteme des Menschen allein sind es, die ihn befähigen, das Glied einer Familie, eines Staates, einer immer mehr Umfang und Bedeutung gewinnenden Menschheitseinheit zu werden; die Geistesfähigkeit des Einzelnen wird zum Gemeingut eines Ganzen. Wir empfinden geistige Wirkungen über den ganzen Erdball hinweg und verwerten sie für den Ausbau unserer Weltanschauung. Alle Nervenfasern des einzelnen Menschen wurzeln gewissermaßen in einem gemeinsamen Nährboden, werden von gemeinsamen Adersystemen gespeist, wie unsere verschiedenen Organe vom Blutkreislauf. Aber auch dieser geistige Einheitsorganismus der Menschheit mußte aus kleinen Anfängen emporwachsen. Aus dem materiell bei der Geburt sichtbaren Zusammenhang zwischen Mutter und Kind entwickelte sich der erste seelische Zusammenhang zwischen zwei Individuen, die Mutterliebe; daraus entstand die Liebe zur Familie, die Vereinigung der Familien zu Kolonien u. s. w., und heute sehen wir die Völker der Erde sich zu internationalen Vereinigungen zusammenschließen, um gemeinsamen Zwecken, z. B. gemeinsamen Verkehrsverhältnissen, zu dienen.

So sahen wir eine wunderbare Welt schöner und immer vollkommener emporblühen, indem sich Organ zu Organ, System zu System fügte, so daß immer eine Summe von niederen Organisationen, deren jede einen Teil ihrer Selbständigkeit aufgab, zu einem höheren Organismus aufwuchs. Diese Entwickelung geht vom Uratom, das frei durch den Weltraum schwirrte, durch die Stufen des chemischen Atoms, des einfachen Moleküls bis zu den zwar noch völlig untermikroskopischen Weltsystemen der Eiweiß- und Protoplasmamoleküle und ihren gallertartigen Verbindungen, und weiter von der ersten einfachsten Zelle bis hinauf zum Wunderbau des menschlichen Körpers, in dem Millionen und aber Millionen von mehr oder weniger selbständigen Wesen ein Ganzes bilden, und endlich zu dem großen Organismus der nach Einheit strebenden Menschheit, in dem der einzelne Mensch nur eine Denk- oder Arbeitszelle ist. Aber jeder Teil ist von der Natur an einen bestimmten Platz gestellt, an dem seine Funktion richtig in Wirksamkeit tritt.

Wie die Entwickelung der Menschheit ungestört ihren Weg geht, obgleich täglich Tausende von Menschen durch den Tod von ihrer Tätigkeit abgerufen werden, unter ihnen wohl immer einige, deren Platz man „unausfüllbar“ wähnte, und wie in der Menschheit ein ewiger Wechsel stattfindet zwischen Geburt und Tod, so gehen auch in dem Einzelindividuum täglich, stündlich Millionen von Einzelwesen zu Grunde, um neugeborenen Platz zu machen. Das ist ja die Hauptaufgabe jedes Organismus, bis hinauf zu den Funktionen des Geistes, das Verbrauchte rechtzeitig zu entfernen und das Bessere an seine Stelle zu setzen. Weil das Einzelne nicht ewig bestehen kann und darf, wenn das Ganze sich entwickeln soll, so ist der Tod das wichtigste Hilfsmittel für das unaufhaltsame Emporstreben des Ganzen. Erkennen wir die Idee Darwins von der Auswahl des Besseren im Kampf ums Dasein an, so muß für jedes sterbende Individuum ein besseres an die Stelle treten, der Tod verbessert also den größeren Organismus, von welchem der kleinere ein Teil war. Allgemein in der Natur ist dieses Auf- und Niederschwanken, dieser beständige Stoffwechsel, der Kreislauf zwischen den verschiedenen Formen des Geschehens überhaupt zu verfolgen. Er kommt zur Erscheinung als Kreislauf der Gestirne, Wechsel der vorzeitlichen Temperaturen mit ihren intermittierenden Eiszeiten, als Sommer und Winter, Tag und Nacht, Träumen und Wachen. Auch

die Umlegung der Erdschichten durch die Gebirgsbildung, der gewaltige Kreislauf des Lebenssaftes unserer organischen Natur und des Wassers, der Aufbau und die Bewegung der Materie von ihrem unorganischen Zustand durch den Pflanzenleib in den des Tieres und ihre Zurückführung zum allgemeinen Nährboden sind auf- und absteigende Wellenbewegungen des Stoffes. Alle diese Wechsel der Natur sind die Folge einer auf- und abschwellenden Lebenstätigkeit im allgemeinsten Sinn, einer Bewegung zwischen Neubildung und Verwesung. Deshalb ist die Verwesung ein ebenso wichtiger physiologischer Faktor wie die Bautätigkeit der Organe, deren Werke wir kennen gelernt haben.

Durch die Verwesung sollen die hochkomplizierten organischen Verbindungen wieder in die einfachen unorganischen zurückgeführt werden. Es handelt sich nicht allein um die wenigen mineralischen Stoffe, die die Pflanzen aus dem Boden geholt haben, sondern in der Hauptsache um die Rückgabe der Organogene aus ihren Verbindungen in Form von Kohlensäure, Wasser und Ammoniak. Wir haben schon gesehen, daß bereits im tierischen Organismus durch den Stoffwechsel Kohlensäure und Wasser gebildet und durch das Blut abgeführt wird, denn auch in dem lebenden Körper sterben ja beständig Zellen ab, und ihre Verwesungsprodukte müssen entfernt werden.

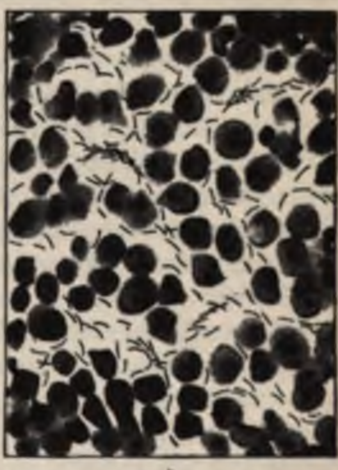
Solange man den Aufbau der organischen Verbindungen noch der Einwirkung eines geheimnisvollen Lebensprozesses zuschrieb, war es verständlich, daß diese Verbindungen wieder von selbst zerfallen mußten, sobald das Leben aus dem Organismus gewichen war. Wir aber müssen den Ursachen der Rückbildung ebenso nachgehen, wie wir den Bildungsprozeß aufzudecken versuchten. Fäulnis und Verwesung treten keineswegs unter allen Umständen in einem abgestorbenen Organismus ein. Wir konservieren Tiere in Alkohol, und in gefrorenem Zustand bleibt Fleisch beliebig lange frisch, ebenso in den arktischen Regionen, auch wenn dort im Sommer ziemlich hohe Temperaturen herrschen. Auf Spitzbergen kann man Renntierfleisch an der Sonne und der Luft bei 5—10° Wärme wochenlang liegen lassen, ohne daß es seine frische rote Farbe verliert oder auch nur im mindesten durch Fäulnis leidet; auch die bei uns so empfindlichen Fische bleiben sehr lange frisch. Schon aus diesen Erfahrungen ist zu schließen, daß die Fäulnis durch Mikroorganismen hervorgerufen wird, die einerseits im Alkohol und anderen Konservierungsflüssigkeiten absterben, anderseits durch die Kälte in ihrer Tätigkeit behindert werden, so daß sie in den reinen arktischen Regionen viel weniger verbreitet sind als bei uns. Die Fäulnis wird dadurch dem Gärungsprozeß sehr ähnlich, ja man kann diesen direkt den beginnenden Fäulnisprozeß pflanzlicher Produkte nennen. Das komplizierter aufgebaute Molekül des Traubenzuckers zersetzt sich unter der Wirkung jener Gärungspilze in das einfachere des Alkohols, wobei Kohlensäure und Wasser auftreten, die charakteristischen Produkte aller organischen Zersetzungen. Es wäre durchaus richtig, wenn wir den Alkohol als ein Fäulnisprodukt des Zuckers erklärten und weiter den Essig als ein solches des Alkohols. Auch die ersten Stadien der Verdauung sind Zersetzungsprozesse, die unter der Einwirkung von Fermenten stattfinden, also Gärungen sind. Die eingeführten Nahrungsmittel werden zunächst löslich gemacht, wobei sie zum Teil in einfachere Verbindungen unter dem Einfluß der Gärungserreger enthaltenden Verdauungssäfte zerfallen. Erst in den aufsaugenden Darmzotten beginnt der chemische Aufbau wieder merklich hervorzutreten. Die nicht aufgesogenen Stoffe zersetzen sich weiter, und von nun an nennen wir den im tierischen Körper vorgehenden Prozeß den einer Fäulnis, dem die rasch zerfallenden Auswurfsprodukte bereits im Mastdarm unterliegen, und zwar wieder unter dem Einfluß jener

Mikroorganismen, die an dem Kreislauf der Lebensvorgänge einen weit bedeutenderen Anteil haben, als man noch vor wenigen Jahrzehnten geahnt hätte.

Man kann heute sagen, daß ohne sie das Leben überhaupt unmöglich wäre. Allerdings sind es Wesen derselben Art, **Bakterien**, welche zu Erregern mörderischer Krankheiten werden. Auch hier zeigt sich wieder, wie fein abgestimmt die Tätigkeit der Natur innerhalb des lebenden Organismus ist. Wesen, die einander in ihrer Art, Form und Eigenschaft ungemein ähnlich sind, nähren hier den Organismus allein und unterhalten ihn, dort vernichten sie ihn mit unüberwindlicher Zerstörungskraft. Die Bakterien der verschiedensten Art haben eben die für die Entwickelung des Gesunden unbedingt notwendige Aufgabe, den beginnenden Zerfall fortzusetzen, der leblosen Natur so schnell als möglich wieder zu geben, was sich im Kampfe mit dem Gesunden nicht widerstandsfähig genug erwiesen hat, damit aus dem zerfallenden Stoff sobald als möglich Besseres aufgebaut werden kann. Einem völlig gesunden Körper können die krankheitserregenden Bakterien nichts anhaben, wenn sie nicht, wie bei Epidemien, in allzu großer Zahl in den Körper dringen. Schädliche, in das Blut gelangte Bakterien werden namentlich von den weißen Blutkörperchen sogleich vertilgt, ehe sie in der Lunge, dem Darm oder anderen Organen Kolonien gründen, Krankheitsherde bilden, in denen sie infolge ihrer enormen Vervielfältigungsfähigkeit durch Spaltung (Spaltpilze) den verderblichen Zersetzungsprozeß über das ganze Organ ausbreiten können, weil sie mächtiger werden als die im gesunden Organismus sehr mächtigen, das Leben erhaltenden Gegenwirkungen. Hält man, was durch Erziehung und gesunde Lebensweise in den meisten Fällen zu erreichen ist, die Verdauungsorgane, Lunge und Blut gesund, so wird der Körper selbst bei Epidemien den Bakterien zu trotzen wissen.



a



b

Bakterien. a Bazillen im Trinkwasser, b Tuberkelbazillen.

Es ist bekannt, daß jede Infektionskrankheit, die man auch als einen Fäulnisprozeß der Organe im lebenden Körper auffassen muß, ihren besonderen Krankheitserreger hat; ebenso sind für jede Gärungsart besondere Erreger entdeckt worden. Man unterscheidet die **Spaltpilze**, die meistens als Krankheitserreger auftreten, von den **Sproßpilzen**, zu welchen z. B. die Hefepilze gehören, die den Gärungsprozeß des Alkohols verursachen (vgl. die Abbildung, S. 484). Aber der Pilz, der die Biergärung besorgt, wird aus Trauben keinen Wein erzeugen können, und der, welcher den Wein erzeugt, kann ihn nicht in Essig verwandeln. Die meisten dieser Pilzarten schweben in der Luft, und wenn man die betreffenden Flüssigkeiten frei an der Luft läßt, geraten sie meist scheinbar von selbst in Gärung, wie auch die Infektionskrankheiten scheinbar von selbst entstehen. Oben sind zwei Arten dieser kleinsten Lebewesen abgebildet,

von denen die einen sich in jedem Trinkwasser finden, die anderen als „Tuberkelbazillen“ von uns gefürchtet werden.

Alle diese Pilze, auch die großen, welche wir im gewöhnlichen Leben unter diesem Namen kennen, nehmen eine ganz besondere Stellung zwischen Pflanze und Tier ein, soweit ihre chemisch-physiologischen Wirkungen in Betracht kommen. Sie enthalten kein Chlorophyll, wie schon ihre Farbe beweist, und vermögen deshalb auch nicht die Kohlensäure zu spalten, wie alle übrigen Pflanzen, so daß sie auch ihre Nahrung nicht direkt aus der anorganischen Natur beziehen können. Da sie nicht anders als durch andere Lebewesen existieren können, sind sie auf ein schmarotzendes Leben angewiesen, wie eigentlich alle Tiere, denen sie in Bezug auf die Chemie ihres Stoffwechsels durchaus ähnlich sind. Darauf beruht die Möglichkeit ihres Wucherns in tierischen Körpern ohne die den anderen Pflanzen durchaus notwendige Wirkung des Lichtes. Diese Übergangsstellung macht die Pilze allein zu ihrer Aufgabe fähig, den Übergang des Organischen in das Anorganische zu bewirken, womit sie den Kreislauf des Lebens schließen.

Eine den mikroskopischen Formen dieser merkwürdigen Wesen eigentümliche Eigenschaft, die sie zu ihren heilsamen wie verderblichen Aufgaben im tierischen Körper besonders geeignet macht, ist ihre Fähigkeit, gerade bei der Bluttemperatur von etwa 37—40° am besten zu gedeihen. Kälte ist ihnen merkwürdigerweise schädlicher als Wärme, und man hat Pilze entdeckt, die im kochenden Wasser ihre Lebensfähigkeit nicht verlieren, und die in dem heißen, verhältnismäßig viel Schwefelsäure haltenden Wasser einer der Solfatara am Vesuv entspringenden Quelle trefflich gedeihen.

In den Fermenten, die im tierischen Körper die Verdauung besorgen, hat man besondere Pilzarten noch nicht nachgewiesen. Da sie aber, wie schon bei dem Speichel (S. 614) erwähnt wurde, die Gärung in derselben Weise hervorbringen wie die Hefepilze, so ist wohl zu vermuten, daß man in diesen „ungeformten Fermenten“ (Enzymen) doch einmal ähnliche Mikroorganismen entdecken wird. Diese Fermente bilden sich in den lebenden Zellen selbst und enthalten wie die Pilze wesentlich mehr Stickstoff, als man in den eigentlichen Pflanzen antrifft; dies stellt sie gleichfalls den Tieren näher, während sie freilich in ihrem organischen Aufbau und ihren organischen Funktionen unendlich weit unter den meisten Pflanzen stehen.

Wo der eigentliche Fäulnisprozeß beginnt, treten auch die sichtbaren Pilze auf, die namentlich die Eiweißstoffe zersetzen. Da jedes Eiweißmolekül ein Atom Schwefel enthält, so verbindet sich dieses bei der Zersetzung mit dem gleichfalls frei werdenden Wasserstoff zu dem übelriechenden Schwefelwasserstoff, welchen wir als den charakteristischen Geruch faulender tierischer Substanzen kennen. Die Pflanzen dagegen enthalten nur sehr wenig Eiweiß; ihre gasförmigen Fäulnisprodukte bestehen aus Kohlenwasserstoffen, namentlich dem einfachsten, dem Sumpfgas (vgl. S. 468). Außerdem tritt bei vorgeschrittener Fäulnis, dem Stickstoffgehalt entsprechend, bei Pflanzenresten weniger, bei tierischen mehr Ammoniak und salpetrige sowie Salpetersäure auf, die den faulenden Stoffen einen stechenden Geruch gibt.

Wahrscheinlich wiederum Bakterien haben einen wesentlichen Anteil daran, daß der in den lebenden Pflanzen und Tieren gebundene Stickstoff den Bereich des Lebens nicht gasförmig verläßt, wie es die übrigen verwendeten Organogene, wenigstens teilweise, tun. Die chemische Trägheit des einmal frei gewordenen Stickstoffes ist bedeutend, und die Organismen haben keine Vorrichtungen, ihn aus der Luft mit sich organisch zu vereinigen. Alle die chemischen Wunderkräfte, die wir zur Bildung der kompliziertesten Verbindungen im lebenden Körper arbeiten

sahen, reichen nicht hin, um jenes träge Element zu fesseln. Würde es beim Fäulnisprozeß freigelassen, wie die übrigen Bestandteile der Organismen, so müßte dies zum langsamen, aber sicheren Absterben alles Lebens führen. Durch das Salpeterferment wird aber der Stickstoff mit dem Sauerstoff der Luft zu Salpetersäure vereinigt, die in den Boden sickert und dort die für den Ackerboden unbedingt nötigen Nitrate, besonders Salpeter, bildet (s. auch S. 432).

Mit der vollendeten Verwesung sind alle Stoffe der anorganischen Natur zurückgegeben. Der Kreislauf des Stoffes vom Leblosen durch die Pflanzenkörper zu den Tieren hinauf bis zur Bildung unserer Gehirnzellen, in denen sich diese ganze Welt im ewigen Wechsel widerspiegelt, und wieder zurück durch die modernde Welt der Pilze zum leblosen Körper der Erde hat sich vollzogen. Unzählige solcher Kreisläufe haben sich abgespielt, seit unser Planet das Leben birgt, und mit dem allmählichen Aufstreben des Lebens zu immer größerer Vollkommenheit haben sich auch die Kreisläufe vergrößert, sind die Bausteine zu immer vollkommeneren Werken der Natur zusammengefügt worden, um immer wertvollere Aufgaben zu erfüllen. Auch haben die Bausteine sich selbst dabei vervollkommnet. Die chemische Zusammensetzung der Ackerkrume und des Humus, welche der Verwesungsprozeß heute der Erde zurückgibt, ist für die Weiterentwickelung der Pflanzenwelt vorteilhafter, als es der Steinboden war, auf dem sich einst die ersten Pflanzen ansiedeln mußten. Bei jedem Lebenskreislauf, den die tote Materie durchläuft, wird sie wie in einem neuen Mühlgang feiner und feiner zerteilt und für eine immer vollkommenere Entwickelung der in ihr wohnenden Lebewelt besser vorbereitet. Überall sind das, was wir Kreisläufe zu nennen pflegen, in Wirklichkeit Spirallinien, die hinauf führen zu höheren Stufen der Naturentfaltung. Die Steigungen in diesen Spirallinien sind sehr verschieden, und meist ist der absteigende Zweig wesentlich steiler als der aufsteigende, wie sich immer leichter ab- als aufbauen läßt. Daher kommt es wohl, daß sich oft die Emporentwickelung unserer Beobachtung entzieht. Wir sehen Geschlechter schnell degenerieren, aber die Vervollkommnung der Lebewelt im Kampf ums Dasein im Sinne Darwins geht so langsam vor sich, daß man immer noch über die Berechtigung dieses natürlichsten aller Naturgesetze streiten kann. In Wirklichkeit herrscht dies Gesetz mit Notwendigkeit in allen Teilen der Naturentfaltung. Die Atome suchen, ohne Lust- und Unlustempfindungen zu verspüren, die in der lebendigen Natur den Kampf um den vorteilhaftesten Platz bedingen, die vollkommenste, stabilste Verbindung mit ihresgleichen nur nach jenen einfachsten Gesetzen der Mechanik herzustellen, die uns selbstverständlich erscheinen. Die stärkere, d. h. stabiler aufgebaute chemische Verbindung reißt die schwächere in ihrem inneren Zusammenhang auseinander und verbindet die Teile mit sich zu einem größeren, vollkommneren Bau. Moleküle vereinigen sich in wunderbarer Weise mit Molekülen zu Systemen, deren Aufbau bereits zu vielseitig ist, als daß wir ihn völlig übersehen könnten, obgleich ihre Ausdehnung noch weit unter der mikroskopisch erreichbaren liegt. Die Systeme werden immer mannigfaltiger, immer leistungsfähiger, und ihre Macht über die Umgebung wächst beständig bis hinauf zum Menschen, der die Natur selbst zu bemeistern beginnt.

Aber nur ein verschwindend kleiner Teil der Materie des unermeßlichen Weltgebäudes ist bis zu dieser Höhe emporgestiegen. Müssen wir zwar die Überzeugung hegen, daß auch auf anderen Weltkörpern rings um uns her eine Lebensentwickelung, vielleicht in ganz anderen Bahnen, stattgefunden hat, so konnte dies doch immer nur auf der Oberfläche der Himmelskörper möglich sein. Ihr ganzer Masseninhalt nimmt nicht an diesem Aufblühen des Lebens aus dem toten Stoffe teil. Hier steigen wir wieder in eine höhere Stufe des Geschehens hinauf, in welcher der Weltkörper zum Atom wird, so daß alles, was auf ihm geschieht,

verschwindet angesichts der gewaltigen Aufgaben, die diese Atomhimmelskörper zu erfüllen haben, indem sie am Bau größerer Organisationen teilnehmen, wie ein Atom Kohlenstoff am Aufbau eines Eiweißmoleküls. Das Leben auf den Oberflächen der Himmelskörper bedarf wohl der Einrichtungen jener größeren Organisationen im Weltraum, es bedarf der Umdrehung des das Leben tragenden Himmelskörpers, der Wärme und des Lichtes der diesen leitenden Sonne; aber diese Weltsysteme bedürfen des Lebens nicht, das nur wie parasitisch auf ihren Oberflächen eine Weile wuchert, bis die Himmelskörper sich zusammentun zu größeren Zwecken, die sich unserm Verständnis entziehen.

3. Die Stufe der Weltkörper.

Bis in die geringfügigsten Einzelheiten ist das Leben abhängig von den astronomischen und astrophysischen Bedingungen, unter denen es entsteht. Von den Wirkungen des Sonnenlichtes auf die Pflanzenwelt haben wir oft genug gesprochen. Wir wissen auch, daß alle chemischen Reaktionen von der herrschenden Temperatur abhängen, im besonderen alle die Vorgänge des Stoffwechsels in den Organismen. Wir haben die Wichtigkeit der beständigen wellenförmigen Schwankungen dieser Verhältnisse erkannt. Sie bilden Tag und Nacht, Sommer und Winter und noch größere Perioden, durch welche die intermittierend auftretenden Eiszeiten und die gewaltigen Umlagerungen der Materie der Erdoberfläche hervorgerufen werden, die den von der Lebenstätigkeit nach und nach ausgesogenen Boden erneuern, indem sie Meeresbecken ans Licht heben und Länder unter die Wogen versinken lassen. Und häufiger noch als der Boden muß das Wasser, der hauptsächlichste Bestandteil alles Organischen, erneuert werden. Aus tausend Äderchen und größeren Läufen fließt es zurück zum Meere wie das Venenblut zum Herzen; die Sonne allein hat die Kraft, aus dem Meere das gereinigte Wasser wieder emporzutragen zu den Wolken und aus ihnen von neuem der Erde zu spenden, um die Quellen alle wieder frisch fließen zu lassen, die überall hin diese Sonnenkraft verteilen. Das kleinste Fischlein benutzt sie gerade so wie der Mensch mit seinen ungeheuern Kraftmaschinen, die schwimmende Riesenpaläste um die Welt führen. Sahen wir in den lebenden Maschinen der Organismen namentlich die in den Molekülen sich versteckenden chemischen Kräfte arbeiten, so begegnen wir in diesem Getriebe der von kosmischen Kräften ausgelösten großen Bewegungen auf und über der Erdrinde hauptsächlich nur physischen Kräften. Ihr Ineinandergreifen zu verfolgen, gelingt uns leichter als das jener unsichtbaren Welt der Atome. Es hat sich eine Wissenschaft der Geophysik oder auch kosmischen Physik ausgebildet, von der wir die Hauptzüge wenigstens an dieser Stelle flüchtig überblicken müssen, denn gerade hier offenbaren sich ja die physischen Kräfte am gewaltigsten in unserer unmittelbaren Umgebung.

Am augenfälligsten ist von diesen Erscheinungen der Kreislauf des Wassers, das wir mit dem Blute des irdischen Organismus verglichen haben. Aus allen seinen Teilen sammelt es sich in den breiten Mündungen der träge von getaner Arbeit fließenden Ströme und gelangt in die zusammenhängenden Meeresbecken, um hier gereinigt zu werden. Die erdigen Bestandteile senken sich auf den Meeresgrund oder setzen sich schon im untern Flußlauf ab. Auch der Salzgehalt des Meeres wirkt reinigend, gewissermaßen desinfizierend, weshalb Meerwasser niemals faulig werden kann. Daß auch im Meere selbst ein Kreislauf stattfindet, der einen beständigen Austausch aller seiner Teile ermöglicht, dafür sorgt zunächst das Gesetz, daß alle wärmeren Körper sich ausdehnen, die kälteren zusammenziehen. Das von den Eiskalotten der Pole

abschmelzende Wasser sinkt zum Meeresboden hinab und fließt dort in Rinnen, gleich Flüssen auf der Erdoberfläche, gegen den Äquator hin, wo es allmählich erwärmt wird, aufsteigt und das von der Sonnenglut erwärmte Wasser von unten her verdrängt und nach den Polen hin abführt. Auch in der Atmosphäre entsteht durch den Kreislauf des Wassers ein wohltätiger Ausgleich. Denn das Meerwasser ist in den Tropen meist kälter, in der kalten Zone wärmer als die Luft und teilt ihr von seinem Überschuß an Wärme mit; das Seeklima ist temperiert. Auch in dieser Hinsicht sehen wir etwas auftreten, das der Tätigkeit des Blutes ähnlich ist: die Wasserzirkulation auf der Erdoberfläche bewirkt einen Temperaturausgleich, der ja eine der wichtigsten Funktionen des Blutkreislaufes ist. Unterstützt wird diese Zirkulation durch die großen Meeresströme, die, ebenso wie die hauptsächlichste Windrichtung, in erster Linie durch die Rotationsbewegung der Erde hervorgerufen werden.

Die Sonnenbestrahlung läßt einen Teil des Wassers an der Meeresoberfläche verdunsten. Eine solche Verdunstung findet immer und bei jeder Temperatur statt und bindet viel Wärme, die abermals im ausgleichenden Sinne wirkt. Bei diesem Vorgang ist es wichtig, daß die Materie der Erde neue Sonnenkraft in sich aufsaugt, aber auf physikalischem Wege, nicht auf chemischem, wie es die Pflanzen tun. Der Kolben der ungeheueren irdischen Maschine wird mit dem Wasser gehoben, es sammelt sich dadurch für die verbrauchte Kraft neue kinetische Energie an, die in den Wolken über uns schwebt, jederzeit bereit, wohltätig oder auch verderbenbringend sich zu entladen. Die befreiten Wassermoleküle werden von der allgemeinen Luftbewegung, die wie die der Meeresbecken eine Folge der Sonnenstrahlung und Erdrotation ist, in die oberen Regionen der Luft emporgetrieben, wo ihr die Rückstrahlung vom Erdboden keinen Überschuß an Wärme mehr erteilen kann. Der Wasserdampf beginnt sich als Nebel zu verdichten, indem sich flüssiges Wasser an kleine Staubteilchen in der Luft heftet, wie der Tau an die Grashalme. Nun erst wirkt allmählich die Massenanziehung der Erde wieder auf das Wasser insoweit ein, daß es zu fallen, d. h. seine aufgehäufte Energie als mechanische äußere Arbeit auszugeben vermag. Aber das Wasser führt meist noch viele Kreisläufe in jenen Höhenregionen aus, ehe es an die Erdoberfläche zurückgelangt. Das fallende Nebelbläschen kommt bald in Regionen, die warm genug sind, um es wieder in Dampfform zu verwandeln, und beginnt nun wieder seinen Weg in höhere Luftschichten. Diese Auflösung geschieht unter sonst ausgeglichenen atmosphärischen Bedingungen in einer ganz bestimmten Höhenschicht. Wir sehen hier oft die Wolken wie abgeschnitten unten ganz horizontale Grenzen bilden. Auch wenn sie ihre Form längere Zeit beibehalten, ist in ihnen doch ein beständiger Wechsel; es regnet aus jeder Wolke beständig nieder, nur gelangt eben der Regen nicht immer zu uns herab, weil er sich an ihrer unteren Grenze stets wieder in Dampf verwandelt, während sie sich oben durch Kondensation erneuert. Wird aber der Feuchtigkeitsgehalt der Luft zu groß, wächst die Wolke zu sehr, so begegnen die in ihr niederfallenden Nebelbläschen häufiger anderen und vereinigen sich mit ihnen. Je größer sie werden, je geringer wird der ihrem Fall entgegenstehende Luftwiderstand; die Tropfen fallen schneller durch die Wolke und vereinen sich immer mehr mit anderen, bis sie schwer und groß genug geworden sind, um auch durch die wärmere Luft unter der Wolke, ohne in ihr wieder aufgelöst zu werden, als Regen bis zur Erde niederzufallen.

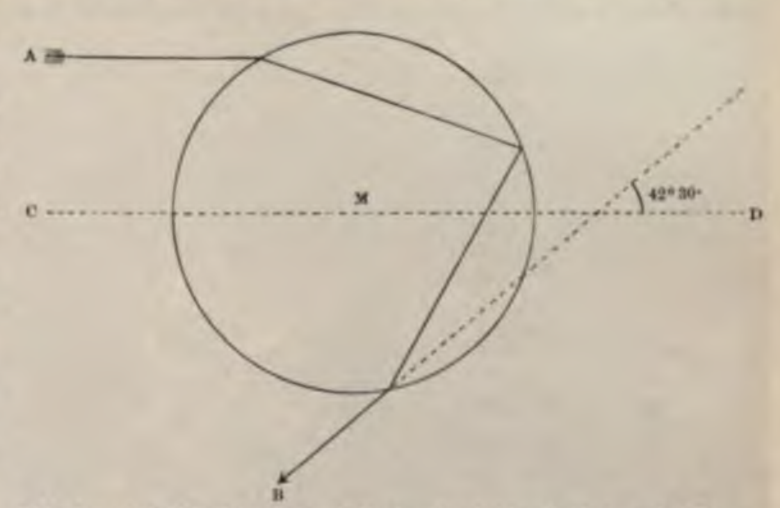
Häufig steigt der Wasserdampf in Regionen, wo die Luft unter Null Grad abgekühlt ist. Dann setzt sich nicht Tau, sondern Reif an die Luftstäubchen, die hier als Kristallisationspunkte auftreten, und es bildet sich der Schnee. Das Wasser kristallisiert im hexagonalen System

aus. Die ersten Elemente der reizenden Schneesternchen (vgl. die Abbildung, S. 546) sind sechskantige Nadeln, die in jenen hohen Regionen zunächst allein frei schweben, ehe sie zu den größeren Systemen der Schneeflocken zusammenschießen. Auch diese Nadeln fallen wie die Nebelbläschen beständig, wobei sie ihre Längsachse in die Fallrichtung, also senkrecht, stellen müssen, weil sie so dem geringsten Luftwiderstand begegnen. Man kann genau vorausberechnen, welche lichtbrechende Gesamtwirkung eine Ansammlung von solchen sechsseitigen Nadeln auf einen sie durchdringenden Sonnenstrahl ausüben muß, und es zeigt sich, daß durch sie eine Erscheinung hervorgerufen wird, die als Nebensonne oder Nebenmond bekannt und in den Polarregionen besonders häufig ist. Es treten Ringe von 22 und 46 Grad Durchmesser um die leuchtenden Gestirne auf, die noch von anderen jene Hauptringe durchkreuzenden Ringsystemen begleitet sind, wie die nebenstehende Abbildung zeigt. Wo zwei dieser leuchtenden Ringe, die an sich oft nur wenig hervortreten, sich kreuzen, erscheint eine besonders helle Stelle, und diese nennt man dann die Nebensonne, deren also vier und mehr gesehen werden können. Als Cornu Alaunkristalle, die gleichfalls hexagonal sind, sich in einer Flüssigkeit ausscheiden ließ, in der sie schwebend erhalten wurden, zeigte ein die Flüssigkeit durchdringender Strahl die gleichen Erscheinungen in den gleichen Winkelabständen. Ganz ähnlich entsteht der Regenbogen in schwebenden Regentropfen (vgl. die farbige Tafel bei S. 95). Bestrahlt die Sonne einen Regentropfen, so müssen die Lichtstrahlen teilweise an seiner Innenfläche total reflektiert werden; es gibt dann eine bestimmte, von dem Brechungsvermögen des Wassers abhängende Richtung, in der am meisten Strahlen in das Auge gelangen (s. die obere Abbildung, S. 639). Der Winkel, den der einfallende mit dem gebrochenen, das Auge treffenden Sonnenstrahl bildet, muß wegen der verschiedenen Brechbarkeit der einzelnen Farben auch für jede derselben ein anderer sein; man findet ihn für rotes Licht gleich 42½ Grad, für violettes dagegen 40½ Grad. Daher zeigt der Regenbogen alle Spektralfarben nacheinander, so daß das Rot außen, Violett innen liegt, und die Breite des Regenbogens beträgt 2 Grad (also etwa vier Sonnendurchmesser). Verlängert man die Richtung von der Sonne zu unserem Standpunkt nach der andern Seite, so daß dadurch der Ort bezeichnet wird, dem am Himmel gerade die Sonne gegenübersteht, so liegt der rote Rand des Regenbogens 42½ Grad von diesem Punkt entfernt. Regenbogen können also niemals gesehen werden, wenn die Sonne noch höher als 42½ Grad über dem Horizont steht, und werden einen um so größeren Bogen bilden, je näher



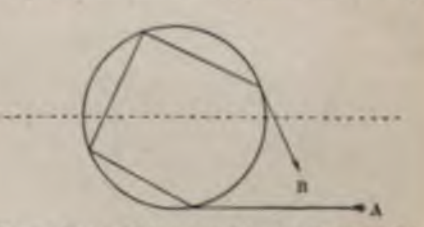
Nebensonne (Halo-Erscheinung), beobachtet am 26. Mai 1901 am Fuße des Claridenstockes im Tödi-Gebiet. Nach G. L. A. Rümker.

die Sonne ihrem Untergangspunkt gerückt ist; bei Sonnenuntergang selbst ragt der Regenbogen bis beinahe zur halben Höhe des Himmelsgewölbes empor. Auch ein zweiter, schwächerer Regenbogen mit umgekehrter Farbenordnung kann entstehen, wenn die Bestrahlung groß genug ist, um auch die mehrfach in den Regentropfen reflektierten Strahlen sichtbar werden zu lassen (s. die untere Abbildung). Der zweite Regenbogen beginnt in einem Abstand von der Gegensonne von 50 Grad und endet mit $53^1/_2$ Grad, ist also breiter als der erste. Viele andere prächtige optische Lufterscheinungen verdanken ihr Entstehen der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit oder sonstigen Beimengungen (vulkanischem Staub), so namentlich die herrlichen Dämmerungserscheinungen, das Morgen- und Abendrot, das Alpenglühen, das mit dem Feuchtigkeitsgehalt wechselnde Himmelsblau u. s. f.



Ablenkung des Lichtes in einem Wassertropfen bei der Entstehung des Regenbogens. A in den Wassertropfen M eintretender Lichtstrahl bei Stellung der Sonne am Horizont, B aus dem Tropfen in einem Winkel von 42° 30' gegen den Horizont austretender roter Lichtstrahl, CD Horizont. Vgl. Text, S. 638.

Zu allen Jahreszeiten bilden sich in den hohen Atmosphärenschichten Eisnadeln. Es kann aber selbstverständlich auf der Erdoberfläche nur schneien, wenn es bis zu ihr hinunter kalt genug ist, um die gebildeten Schneeflocken bei ihrem Niederfallen nicht wieder auftauen zu lassen. In den Sommertagen werden heftige Bewegungen in den höheren Luftschichten solche Wolken von Eisnadeln, die uns als Zirrus- oder Schäfchenwolken erscheinen und nach direkten Messungen die am höchsten emporsteigenden Wolken sind, mit Regenwolken zusammenwirbeln. Lassen wir dies im Laboratorium geschehen, so beobachten wir immer das Auftreten freier Elektrizität, die durch die Reibung von Wasser an Eis frei wird. Dies scheint nach den neueren Ansichten die Ursache der Gewitterbildung zu sein, über die indes die Akten noch immer nicht geschlossen sind. Zwischen den verschieden warmen und elektrisch gewordenen Luftschichten werden oft die Schneeflocken mehrfach hin und her geworfen, wie die Holundermarkkügelchen in dem elektrischen Tanz (S. 316); aus den Flocken werden durch Auftauen und Wiederfrieren „Graupeln“ oder wohl auch Hagelkörner.



Gang eines mehrfach reflektierten Lichtstrahles im Wassertropfen. A ein-, B austretender Strahl.

Das von der Sonnenstrahlung destillierte und in den hohen Luftschichten sogar auskristallisierte Wasser ist so gründlich wie nur möglich gereinigt; in diesem Zustand ist es

sogar für den Gebrauch der Organismen zu rein. Der Regen sickert in den Erdboden und nimmt hier die mineralischen Bestandteile auf, die die Pflanzen brauchen, und die uns das Trinkwasser allein schmackhaft machen. Auf den Höhen der Berge sammelt es sich in den Reservoiren



Firn und Gletscher in den Hochalpen (Großglockner). Nach Sievers, „Europa".

der Firne und Gletscher (s. die obenstehende Abbildung), aus denen auch in den heiteren regenarmen Sommertagen den Tiefebenen, in denen unsere Nahrung reift, Wasser genug zugeführt wird, ohne daß es immer aus den Wolken direkt herabzukommen braucht, die den Pflanzen den notwendigen Sonnenschein rauben. So sehen wir überall in der Natur Reguliervorrichtungen, deren vielverschlungenes Ineinandergreifen zu verfolgen eine der reizvollsten

Aufgaben des Naturbeobachters ist. Die schneebedeckten Gipfel der Hochalpen, die selbst aller Lebenstätigkeit der Natur entzogen sind, erhalten und verschönen uns allen das Leben aus ihrer weltentrückten Ferne her. Je schöner das Wetter ist, je mehr Wasser also unten verdunstet, ohne durch Regen wieder ersetzt werden zu können, desto kräftiger schmilzt von den Firnen der Schnee und speist durch Millionen Adern die Quellen und Flüsse um so reicher mit dem Blute der Erde. Deshalb zeigen auch die großen Ströme, die ihre Quellen im Hochgebirge haben, zwischen Sommer und Winter weit geringere Niveauschwankungen als die in den

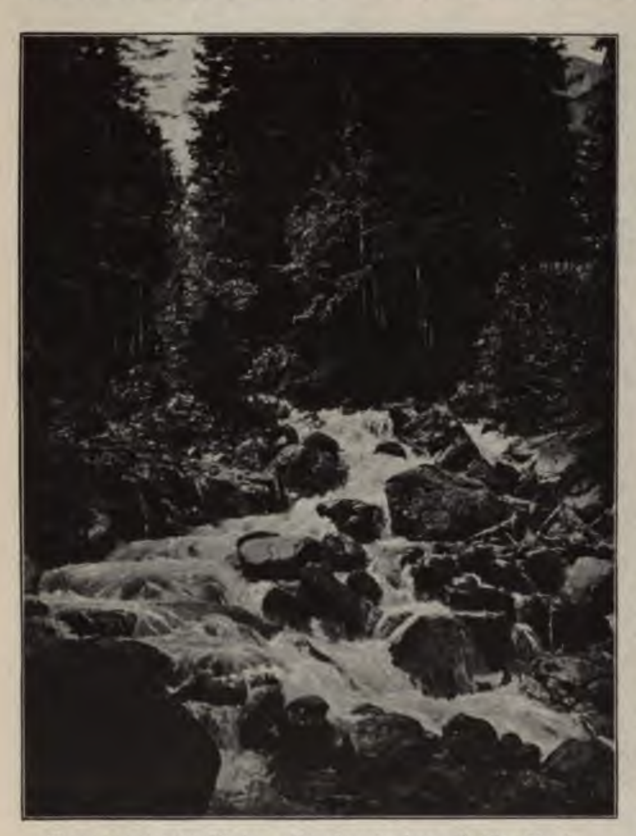


Erdpyramiden im Monumentpark, Wyoming (Vereinigte Staaten von Nordamerika). Nach Neumayr, „Erdgeschichte“. Vgl. Text, S. 642.

Mittelgebirgen entspringenden, der Rhein also weniger als die Elbe. Und darum verdorrt auch im Hochsommer der im Frühjahr so üppige Pflanzenwuchs in den nordamerikanischen Prärien, weil sie nicht von Flüssen getränkt werden, die im firnbedeckten Hochgebirg wurzeln. Die regelmäßigen Überschwemmungen des Nils sind die Folge der geschilderten Verhältnisse, weil in den oberen Teilen seines Laufes im Frühjahr reiche Niederschläge fallen, die aber dort nicht durch eine genügende Höhenlage als Schnee und Gletschereis zurückgehalten werden können.

Die **Flußläufe** sind die Arterien und die Venen des Erdkörpers zugleich. In ihren oberen Teilen leiten sie das frische Wasser aus Millionen Quellen einem neuen Lebenskreislauf zu, in den unteren sammelt sich das verbrauchte Wasser, um wieder dem wogenden Herzen, dem Meere, zugeführt zu werden, von wo es die Sonne, nachdem es gereinigt und mit neuen Kräften erfüllt ist, emporhebt und überallhin verteilt.

Aber noch eine andere Aufgabe hat das Wasser hierbei zu erfüllen. Es trägt die Gebirge in den Meeresgrund hinab. Das kleinste Gerinnsel macht sich sein Bett und stürzt die Steine talabwärts. Alle die Alpentäler und Schluchten, die wir bewundernd durchwandern, sind mit sehr wenigen Ausnahmen vom Wasser und den wühlenden Gletschern der Eiszeiten in die Masse des Gebirgsstocks eingeschnitten worden. Selbst der strömende Regen kann mit der Zeit große Mengen von loseren Erdmassen wegschwemmen, wie man in recht auffälliger Weise an den Erdpyramiden sieht, bei denen ein in dem Schotter eingebetteter Stein die unteren Erdmassen vor dem Hinwegschwemmen schützte. Am Ritten bei Bozen, im Monumentpark im Staate Wyoming der Vereinigten Staaten (s. die Abbildung, S. 641) sieht man auf weiten Strecken solche Erdpyramiden aufragen und bewundert hier, welche gewaltige Massen allein der Regen rings um sie weggeführt hat. Sehen wir auf unseren Ferienwanderungen im Gebirg die Bäche mit großen Steinen erfüllt, um die sich das oft spärliche Wasser schäumend bricht, so kann man sich nicht vorstellen, daß es dasselbe Wasser war, das diese Riesenblöcke vom Gebirge herabrollte (s. die nebenstehende Abbildung). Aber im Frühsommer, wenn die Schneeschmelze im Hochgebirge bedeutender wird, werden diese einst kristallhellen Wässerlein zu hoch angeschwollenen Wildbächen und man hört häufig von ihrem Grunde herauf ein dumpfes Donnerrollen und ein eigentümliches Geräusch, das an ein fernes ununterbrochenes Gewehrfeuer erinnert. Der Wildbach wälzt die Steinblöcke auf seinem Grunde vorwärts, daß sie donnernd und prasselnd aneinander schlagen und man am Uferrand ein beständiges leises Erdbeben verspürt. Ein wahrer Strom von Steinen geht mit dem Wasser bergab dem Meere zu. Schon in den Schneeregionen beginnt diese Zerstörungstätigkeit des Wassers; es sickert in die feinsten Felsspalten und sprengt, hier gefrierend, bei seiner Ausdehnung Felsen mit unwiderstehlicher Gewalt auseinander. Es nagt unaufhörlich an dem härtesten Gestein, jedes Rinnsal gräbt sich mit der Zeit tief in den Grund ein; die erodierende Wirkung des Wassers, die das Gestein zerklüftet (s. die Abbildung, S. 643) setzt sich immer mächtiger fort bis zur großartigsten Talbildung, die ganze Gebirgszüge trennt. Beim Eindringen in die loseren Gebirgsschichten unterwühlt es oft die Abhänge dermaßen, daß



Transport von Steinmassen durch einen Gebirgsbach.
Nach Photographie.

sie schließlich als verheerende Bergstürze abrutschen und in die Talsohle (s. die Abbildung, S. 644) niederdonnern. Immer nur bergab kann es die Massen führen, und ungeheuer sind die Mengen, welche es stündlich jahraus jahrein am Meeresboden seit Jahrmillionen ablagert. Hier ruht das Erdreich mit den eingebetteten Resten einer üppigen Lebensentwickelung, die es aufbauen half, von unzähligen Kreisläufen aus, die es dort oben, belebt von den unerschöpflichen Kräften der Sonne, durchwanderte.



Erosionswirkung des Wassers im Salt Creek Cañon der Rocky Mountains (Vereinigte Staaten von Nordamerika). Nach Neumayr, „Erdgeschichte". Vgl. Text, S. 642.

Diese Zerstörungsarbeit des Wassers kann offenbar nur den absteigenden Zweig eines größeren Kreislaufes bilden, der dem Stoffe vorgeschrieben ist. Denn es könnte sonst längst keine Gebirge mehr auf der Erde geben, wenn dieser zerstörenden Tätigkeit des Wassers nicht eine wieder aufbauende, eine gebirgsbildende Macht entgegenstände. Wo nehmen wir diese Riesenkräfte her, welche den Meeresboden zu den Wolken heben? Denn daß dies in der Tat geschehen ist, beweisen die geologischen Befunde. Auf schneebedeckten Gipfeln findet man sogenannte Sedimentgesteine, die sich notwendig einstmals aus dem Wasser abgelagert haben müssen, und in ihnen die Reste von Geschöpfen, die nur im Meere gelebt haben können. Freilich bestehen die meisten höchsten Erhebungen der größeren Gebirgsgruppen aus ungeschichtetem Urgestein, dem Granit und seinen kristallinischen Verwandten, die keine Reste lebender Wesen enthalten. Man vermutet, daß dieses Urgestein einstmals die erste feste aus einem feuerflüssigen Zustand der Erdoberfläche durch die zunehmende Abkühlung entstandene Kruste sei. Andere meinen, daß es nur aus Sedimentschichten besteht, die sich aus heißen Meeren einst auskristallisiert hätten. Jedenfalls gehören

diese Gesteine den ältesten Zeiten der Erdentwickelung an, auf welche sich alle übrigen Schichten, alle die Formationen, welche die Geologen unterscheiden, abgelagert haben müssen. Gerade sie aber befinden sich heute zum Teil auf den höchsten Spitzen unserer gewaltigsten Gebirgsstöcke. Man sieht an den zu beiden Seiten der aufgewölbten Granitkuppen abgelagerten Sedimentgesteinen, daß eine gleichmäßige, zusammenhängende Schicht derselben die Granitunterlage überdeckt hatte, aber nach der ganzen Lage der Dinge entweder bei einer Aufwölbung der Granitkuppe abgerissen und zu beiden Seiten abgerutscht ist oder vom Wasser an den höchsten



Bergsturz. Nach Photographie des Verfassers. Vgl. Text, S. 643.

Stellen der Kuppe weggewaschen wurde (s. die Abbildung, S. 645). Die schon einmal vom Wasser bearbeiteten Gesteine sind lockerer und werden deshalb leichter von ihm angegriffen und zu einem zweiten Kreislauf veranlaßt als die harten Urgesteine, die dem Wasser dagegen sehr lange trotzen und auf diese Weise die wichtige Aufgabe der Wasserreservoirs der Hochgebirgsmassen länger erfüllen können als Gebirge, die keinen Urgesteinskern haben. Nur da, wo zu der bloßen auswaschenden Wirkung des Wassers noch die sprengende Wirkung des Eises hinzutritt, deren große Gewalt wir schon wiederholt kennen gelernt haben (vgl. S. 181), werden auch die Granitfelsen kräftiger angegriffen. So bildeten sich die tiefen Einschnitte der Fjorde Norwegens, als es noch einem weit rauheren Klima ausgesetzt war als jetzt; in allen Polarregionen, und nur in diesen, mit Inbegriff derjenigen, die es früher waren, findet man die charakteristischen Fjordlandschaften wieder (s. die beigeheftete farbige Tafel „Der Sognefjord im südwestlichen Norwegen").



Wo nehmen wir die Kräfte her, die den Erdboden in Wellenlinien aufwarfen wie der Wind die Wasserfläche? Brauchten wir schon, um das Wasser aus den Meeren wieder zu neuem Kreislauf zu heben, kosmische Gewalten, so wird dies für die Bewegungen der festen Erdrinde in noch höherem Maße nötig sein. Ehemals hatte man dem Vulkanismus diese Aufgabe zugeschrieben. Durch die fortschreitende Abkühlung der Erdrinde mußte dem Körper unseres Planeten seine Haut allmählich zu klein werden. In ihr bildeten sich nach der älteren Theorie lange Risse, durch die der glühende Fluß des Inneren austreten sollte. Die reihenweise Anordnung der Vulkane längs solcher „Bruchlinien“, deren größte die gewaltige Andenkette ist, konnte wohl für diese Ansicht sprechen, aber die genaueren Untersuchungen der Lagerungs- und anderen Verhältnisse haben doch sicher erwiesen, daß die vulkanischen Erscheinungen an diesen Stellen immer nur sekundärer Natur sind; die Vulkane brachen durch, nachdem die Spalten entstanden waren, sie sind nicht die Ursache, sondern die Folgeerscheinung. Der Druck, welcher die Gebirge aufwarf und die Spalten bildete, griff nicht von unten nach oben, sondern seitlich an. Er brach die ursprünglichen, zusammengeschmolzenen Schollen des Urgesteins wieder auseinander, schob und drängte sie über- und nebeneinander hin. Das alles aber erfolgte meist mit großer Langsamkeit und vollzieht sich noch heute unter unseren Augen, wenn wir die Erde da erbeben sehen, wo jede vulkanische Ursache ausgeschlossen ist, z. B. in dem berüchtigten Erdbebengebiet von Laibach.



Urgesteinskern im Sedimentgestein der Alpen (schematischer Durchschnitt). a kristallinisches Urgestein, b b Grauwacke, c c Kalk, d d Sandstein, e e Ebene. Nach Neumayr, „Erdgeschichte“. Vgl. Text, S. 644.

Die Gewalten, welche die Gebirge auftürmten, sind dieselben, die der Erde ihre Form gaben. Wie die Schwerkraft jedem Steine denjenigen Platz anweist, für den alle mitwirkenden Kräfte im Gleichgewicht sind, so muß sie auch jederzeit die ganze Form der Erde so gestalten, daß ihre Oberfläche eine „Niveaufläche“ wird. Wir wissen, daß diese Gleichgewichtsfigur der Erde keineswegs eine Kugel sein kann, bei der jeder Oberflächenteil gleichweit vom Erdmittelpunkt entfernt ist. Durch die Umschwungsbewegung um ihre Polarachse wird jene Gleichgewichtsfigur zu der eines Rotationsellipsoids, dessen Achsenverhältnisse wir Seite 56 ausrechneten und mit der Beobachtung in Übereinstimmung fanden. Dieses Achsenverhältnis ist von der Umdrehungsgeschwindigkeit abhängig, d. h. von der Länge des Tages. Diese aber muß durch beständige Einwirkungen verschiedener Art immer größer werden, weil die Erde nicht allein im Weltall schwebt und jeder von außen kommende Einfluß auf sie nur hemmend wirken kann. Dadurch verringert sich beständig die Abplattung, und es findet eine fortwährende Wanderung der Oberflächenschichten nach den Polen hin statt, ein vom Äquator nach beiden Seiten hin wirkender Schub, der allerdings äußerst gering sein muß, weil nach den Beobachtungen die Tageslänge seit den letzten Jahrtausenden nicht merklich größer geworden ist. Aber es treten hierzu noch mehrere andere Gleichgewichtsstörungen, die Lage der Erdachse verschiebt sich aus bisher unbekannten Gründen im Erdkörper um ein Meßbares (Polhöhenschwankungen). Die neuere Forschung hat erwiesen, daß diese Wanderung der Erdachse periodisch und möglicherweise in Spirallinien verläuft, die den Pol im Laufe der Jahrtausende um eine nicht unbedeutende Strecke verschieben. Damit müssen aber

gleichzeitig, um das Gleichgewicht herzustellen, die riesigen Massen der äquatorialen Anschwellung der Erde wandern.

Vielleicht aber sind diese Polhöhenschwankungen nicht die Ursache von größeren Verschiebungen der Erdmasse an ihrer Oberfläche, sondern die Folge davon. Es ist mit Sicherheit nachgewiesen, daß die Erde periodische, auf kosmischen Ursachen begründete Eiszeiten erlebt hat, in deren Verlauf z. B. das ganze nördliche bis mittlere Europa von einer Eisdecke überlagert war, die an Größe der des heutigen Grönland zum mindesten gleichkam. Dadurch wurden in diesen Gebieten gewaltige Massen angesammelt, deren Transport in der Erde selbst zunächst nicht sein Gleichgewicht fand, so daß eine Gegenwirkung erst geschaffen werden mußte. Nun spricht aber sehr vieles dafür, daß diese Eiszeiten zwischen den beiden Erdhalbkugeln abwechseln, so daß gegenwärtig die Südhalbkugel in einer Eiszeit begriffen zu sein scheint, während wir auf der nördlichen Halbkugel die Mitte einer Interglazialperiode eben überschritten haben. Eine Erdhälfte wird also durch diese Eiszeiten mehr belastet als die andere, und zur Herstellung des Gleichgewichtes muß demnach ein Massenaustausch zwischen den beiden Halbkugeln stattfinden. Von der in der Eiszeitperiode begriffenen Hälfte werden sich die Landmassen hinwegzuschieben trachten, die Wassermassen dagegen werden sich mehr und mehr dort ansammeln; die Eiszeithalbkugel ist die wasserreiche, die andere die landreiche, wie es gegenwärtig bei unseren beiden Erdhälften der Fall ist.

Wir haben alle Anzeichen dafür, daß vor geologisch ganz kurzer Zeit, die vielleicht noch an die prähistorischen Zeiten grenzt, ein großes Landgebiet sich in den Indischen Ozean versenkt hat, von dem uns Reste in den ostindischen Inseln und dem australischen Kontinent erhalten sind. Anderseits sehen wir vor unseren Augen die nordischen Gebiete Europas sich aus den Wogen heben. Skandinavien ist ein Beispiel hierfür, denn bei ihm weist man die gleichmäßige Hebung durch Messung nach. Alle arktischen Länder zeigen so deutlichen Terrassenbau, daß man an ihrem allmählichen und doch wieder zeitweilig unterbrochenen Aufsteigen nicht zweifeln kann (s. die Abbildung, S. 647). Hier haben wir die großen Massenumlagerungen vor uns, die wir für den Kreislauf des Erdreichs gebrauchten, um der nivellierenden Wirkung des Wassers entgegenzuarbeiten. Die beiden durch den Äquator getrennten Hälften der Erde waren abwechselnd Land- und Wasserhalbkugeln. Während die Lebenstätigkeit der einen ruhte oder wesentlich eingeschränkt war, entwickelte sich dagegen auf den breiter und breiter werdenden Kontinentalsockeln der anderen Hälfte das Leben auf einem ausgeruhten frischen Boden um so besser. Das Leben wanderte mit den wachsenden Erdschollen langsam hin und wieder zurück, zuletzt von Süden nach Norden. Es wäre nicht unmöglich, daß die gegenwärtig hinausgesandten Südpolarexpeditionen unter dem Eise, das heute hoch über den zurückgebliebenen Landmassen der Antarktis ruht, Reste von jenen Uranfängen einer Kultur entdecken, aus der die ägyptische, indische, chinesische und inkanische Kultur gleichzeitig abzuleiten wären. Die nordwärts vom vordringenden Eis über die inzwischen zusammengefallenen Inselbrücken der südlichen Erdhälfte getriebenen Völkerstämme hätten sich jenseit des Äquators getrennt über die Kontinente unserer Hemisphäre verteilen müssen, immer beseelt von einem unwiderstehlichen Zuge nach Norden, der heute noch besteht.

So sehen wir neben dem jährlichen einen nach vielen Jahrtausenden zählenden Jahreszeitenwechsel zwischen den beiden Halbkugeln auftreten, während dessen die Naturgewalten Landmassen umlegen, wie im Frühjahr der Landmann seine Scholle wendet, um sie wieder fruchtbar zu machen.

Die Ursache dieser Eiszeitperioden ist nach vorwiegender Ansicht eine rein astronomische. Für sie ist nicht nur das Verhältnis der Erde zur Sonne bestimmend, das wir bisher allein in den Haushalt der irdischen Natur eingreifen sahen, sondern alle Planeten unseres Systems wirken mit. Venus und Mars und die fernen großen Brüder der Erde, Jupiter und Saturn, jene leuchtenden Punkte am Firmament, sind es also, die den Wesen auf der Erdoberfläche die Wege anweisen, die sie im Laufe der Jahrtausende zu durchwandern haben, um unter immer neuen Verhältnissen sich zu stärken und zu entwickeln. Alle diese Sterne beteiligen



Terrassenbau der Tempelberge auf Spitzbergen. Nach Sievers, „Europa“. Vgl. Text, S. 646.

sich an dem Aufbau und der unablässigen Verbesserung unserer irdischen Natur, wie anderseits auch die Erde an der anderer Welten, wie verschiedenartig sie auch sein mögen, mithilft.

Würde unser Weltsystem nur aus Sonne und Erde bestehen, so müßten wir stets genau in der gleichen Bahnebene um die Sonne unsern Jahreslauf vollenden, und die Jahreszeiten würden auf beiden Hälften der Erde immer im gleichen Verhältnis zueinander stehen. Der Weg der Erde um die Sonne ist aber keine Kreisbahn, sondern eine Ellipse; so kommen sich beide Gestirne zu gewissen Zeiten näher als sonst, und die größere Anziehungskraft der Sonne läßt dann die Erde schneller laufen. Die größte Annäherung der Erde zur Sonne, das Perihel, findet gegenwärtig gerade zu Jahresanfang, also im Winter unserer Halbkugel, statt. Durch diese Annäherung der Sonne wird unser Winter etwas gemildert, freilich aber dafür etwas abgekürzt. Gerade das Umgekehrte findet auf der Südhalbkugel statt, wo die Sonnennähe in das Sommerhalbjahr trifft, die Sonnenferne mit dem Winter zusammenfällt. Die Winter sind

deshalb bei uns kurz und milde, auf der Südhalbkugel lang und streng. Daher entsteht der so sehr große **klimatische Unterschied** zwischen beiden Erdhälften, der sich für einen gleichen Parallelkreis auf beinahe 10 Wärmegrade beläuft.

Aber die Erde wird auch noch von allen ihren Gefährten im Sonnensystem beeinflußt, wodurch die Richtung der kürzesten Entfernung zwischen uns und dem Zentralgestirn selbst einer Bewegung unterworfen wird. Man bezeichnet sie als Bewegung der **Apsidenlinie**, die nach mathematisch streng ausführbarer Vorausberechnung die Verhältnisse in etwa 10,400 Jahren genau umkehrt, so daß dann wieder die nördliche Erdhälfte in jene extremen Zustände kommt, die jetzt die Südhälfte in die Eiszeit brachte (s. auch des Verfassers „Weltgebäude", S. 502 u. f.). Die **Glazialperioden** wiederholen sich also in Zwischenzeiten von etwa 21,000 Jahren. Innerhalb dieser Zeit schwankt das Meeresniveau, schwanken die Landmassen, wandert der Höhenpunkt der Naturentfaltung zwischen den beiden Halbkugeln hin und her. Hier haben wir den **größeren Kreislauf der Materie** vor uns, der den Meeresboden zum Tageslicht emporhebt, damit er wieder teilnehmen kann an der Fortentwickelung des Lebendigen, während er in der Tiefe nur als gemeinsame Grabstätte des Lebens gedient hatte. Und diese fortdauernden Verschiebungen der Landmassen haben auch unzweifelhaft an dem Aufbau der Gebirge selbst teilgenommen. Da, wo bereits ein Rücken aus Urgestein sich emporgehoben hatte, brachen sich, wie die Wellen am Meeresgestade, auch die polwärts wandernden Landschollen und türmten sich auf, wie es in der verhältnismäßig noch nicht sehr weit zurückliegenden Tertiärperiode bei dem Massiv der Alpen geschehen ist. Gerade dieses Wasser, welches im freien Zustand die Abtragung der Gebirge bewirkt, läßt sie wieder emporsteigen, sobald es durch die eindringende Kälte selbst zu Stein geworden ist. Immer und immer wieder sehen wir die wunderbarsten Selbstregulierungen wirken, welche den Bestand und das fortdauernde Aufstreben der Natur sichern.

Neben dieser Bewegung der Apsidenlinie wirken aber noch verschiedene andere kosmische Ursachen auf die **Umlegung der Landmassen** ein, die zur Zeit nicht oder überhaupt niemals einer genauen rechnerischen Kontrolle zu unterziehen sind. Wir haben vorhin schon erwähnt, daß in diesem Sinn auch die Verlangsamung der Achsendrehung der Erde wirkt. An dieser Wirkung nehmen zweifellos die täglich in ungeheueren Mengen aus dem Weltraum zu uns herabstürzenden **Meteore** teil, deren Masse die Erde ihre Rotationsbewegung mitteilen muß, so daß sie selbst davon einbüßt. Auch dieser Betrag ist jedenfalls sehr gering; aber im Laufe der Jahrhunderttausende können wohl auch einmal größere Massen aus dem Weltraum mit uns zusammentreffen, die sicher dort vorhanden sind, und ein solcher Zusammenstoß, der für die Erde und ihre Bewohner, abgesehen vielleicht von lokalen Katastrophen, durchaus noch keinen nachteiligen Einfluß zu haben braucht, könnte die Ursache einer dauernden Verlegung der Erdachse sein, die dann notwendig auch eine langsam verlaufende Umlegung der Landmassen zur Folge haben müßte. Die heute beobachteten Polschwankungen sind vielleicht Reste solcher größerer Störungen. Auch ist es möglich, daß die Erde einstmals noch einen kleineren und näheren Mond gehabt hat, der auf sie zurückstürzte.

Solche **Zusammenstürze von Weltkörpern** werden um so seltener stattfinden, je größer sie sind, weil eben die größeren Weltkörper, wie überhaupt alle größeren Körper, immer seltener sind als kleinere. Das Größere ist überall aus vielen kleineren Teilen entstanden. Für das Leben auf den Weltkörpern verderbliche Zusammenstöße werden darum nur sehr selten eintreten, seiner ruhigen Entwickelung sind zweifellos durchschnittlich immer sehr große Zeiträume

gegeben. Freilich sind überall Katastrophen möglich, die auch unserm Leben ein unverhofftes Ende setzen können. Unter den Millionen von Sternen, welche die Milchstraße und das ganze Firmament füllen, erscheint nur sehr selten, kaum alle Jahrzehnt, ein neuer Stern, dessen Aufleuchten eine solche Katastrophe verrät. Der neue Stern im Perseus, der Ende Februar 1901 erschien, ist eines der schönsten und merkwürdigsten Phänomene dieser Art. Aber es waren immer Sterne, die vorher entweder gar nicht oder doch nur äußerst schwach leuchteten, welche durch solche Katastrophen zu einem plötzlichen, nur wenige Wochen oder Monate anhaltenden, langsam wieder verlöschenden Aufflackern gebracht wurden; niemals sahen wir noch kräftig leuchtende Sonnen, etwa von der Art der unsrigen, miteinander zusammenstoßen oder ihre Leuchtkraft plötzlich, katastrophenhaft für die Dauer verändern. Alle jene Sterne waren schon längst im Absterben begriffen, in absteigender Kurve ihres Entwickelungskreislaufs, der durch diese gewaltigen Vorgänge nur beschleunigt wurde, um die Materie vielleicht um so schneller wieder zu neuem Aufblühen emporzuheben.

Bei alternden Weltsystemen müssen in der Tat die Zusammenstöße immer häufiger werden, weil deren Planeten sich ihrer erkaltenden Sonne mehr und mehr nähern und schließlich mit ihr zusammenstürzen, ganz ebenso wie in den molekularen Systemen die Atome sich allmählich dem Schwerpunkt nähern, bis sie bei Erreichen des absoluten Nullpunktes der Temperatur ebenfalls zusammenfallen. In jener höchsten Stufe von Massengruppierungen, die wir sinnlich noch zu erreichen vermögen, in der Stufe der Himmelskörper, ist eben die Umlaufsbewegung der Planeten um den Massenschwerpunkt des Systems gleichbedeutend mit der verborgenen Kraft, die wir in der untersten Stufe der Atome als potentielle Energie oder Spannkraft bezeichnet haben, die durch niemals fehlende Einwirkung von außen beständig vermindert wird, während zugleich die gesamte bewegte Masse sich vergrößert. In der Stufe der Himmelskörper übersehen wir dies noch besser als in der der Atome. Wenn ein solcher Körper in seinem Flug einen anderen antrifft, der eine geringere Geschwindigkeit hat, so kann er diesen beim Zusammenstoß wohl mit sich fortreißen, wenn er selbst größer ist als jener. Der Masse des kleineren wird dann allerdings eine größere Geschwindigkeit erteilt, als sie sie vorher innehatte, aber die Masse des anderen Körpers muß in demselben Verhältnis langsamer fortschreiten, die größere Anzahl von Masseneinheiten hat an Geschwindigkeit verloren. Von seiner Gesamtkraft ist dabei dem System nichts genommen; es kann im Gegenteil als größerer Körper eine größere Gesamtkraft nach außen üben. Die Weltkörper wachsen wie die Moleküle

Wir würden zu sehr in Wiederholungen verfallen, wenn wir noch einmal hier das Spiel der Atome mit dem der Himmelskörper in Parallele stellen wollten, wie wir es überall in diesem Werke zu tun Gelegenheit hatten. Die Spirallinien der „Kreisläufe" sehen wir sich immer gewaltiger erweitern. Die ausgelebten Weltsysteme, die alle ihre Planeten wieder mit ihrer Sonne vereinigt, alle ihre potentielle Energie verarbeitet haben, sind somit innerhalb ihrer Stufe zum regungslosen Atom von Weltkörpergröße geworden, das nur noch Eigenbewegung im Raume, kinetische Energie, besitzt, ohne sie indes allein verwenden zu können. Vermöge dieser Eigenbewegung sucht nun dieses Weltkörperatom seinesgleichen im weiten Weltraum, um sich zu einem neuen größeren System, zu einem neuen Molekül zusammenzuschließen. Ein neuer Kreislauf, notwendig größer als der zuletzt durchlaufene, beginnt und kann zu einer höheren Entwickelungsstufe emporsteigen, als es dem kleineren, ausgelebten System möglich war. Da wir alle physikalischen und chemischen, überhaupt alle Naturerscheinungen auf Bewegungen von Masseneinheiten zurückgeführt haben, so müssen sich in jedem höheren System auch alle diese

Erscheinungen wiederholen, und es steht in der Tat der Annahme nichts entgegen, daß es Stufen der Weltentwickelung gibt, in denen unsere Sonnen die Atome sind, und die doch für ein entsprechend zusammenfassendes System von Sinneswerkzeugen denselben Eindruck machen würden, wie unsere Welt, in der wir leben. Es hat im Sinn unserer modernen Weltanschauung weder etwas Phantastisches noch irgendwie Übernatürliches, wenn wir die Möglichkeit aussprechen, daß die ganze Milchstraße mit ihren Millionen von Einzelmassenpunkten, die wir Sonnen nennen, ein einziges Eiweißmolekül eines lebenden Wesens in einer Weltstufe darstellt, auf der wir Menschen ein Atom bewohnen. Prinzipiell im Sinne der Einheit der Naturkräfte sind der Aufbau beider Massenansammlungen und ihre Bewegungsverhältnisse durchaus gleich. Müssen wir denn ein Ende der Welt absehen? Das wird uns nie und nimmer gelingen; stets werden sich die Stufenfolgen der Naturentfaltung nach unten wie nach oben im Unendlichen verlieren. Wir sehen und erkennen nur immer die wenigen Stufen, für die unsere Sinnesorgane, unser Nervensystem, unser Geist, geschaffen sind.

Wie glücklich sind wir, daß es uns vergönnt ist, zu erkennen, daß es solche Stufen überhaupt gibt, und daß sie empor, nur immer empor führen!

Die moderne Physik will zwar diesen letzteren Satz von der beständig aufsteigenden Entwickelung nicht recht anerkennen. Seit Clausius beschäftigt sie die Frage von der sogenannten Entropie des Weltalls. Neben dem unumstößlichen Satze von der Unveränderlichkeit der Gesamtkraft eines abgeschlossenen Weltkomplexes muß man zweifellos noch den anderen Satz anerkennen, daß die beiden Arten von Energie, die wir kennen gelernt haben, die Spannkraft und die lebendige Kraft, die vor unseren Augen arbeitet, beständig ineinander übergehen können, aber sie können nur in dem einen Sinn übergehen, daß in einem für sich bestehenden System irgendwelcher Art, das von außen her keine neuen Kräfte bezieht, die lebendige Kraft in Spannkraft verwandelt werden muß. Diese aber vermag an sich keine Arbeit nach außen hin zu leisten, und ist der Übergang in diesem Sinn einmal vollendet, dann wird alle Materie dieses Systems jeder Regung, jeder Entwickelung dauernd unfähig. Da für jedes einzelne System hierüber kein Zweifel ist, wie wir vielfach in unseren vorangehenden Betrachtungen erfahren haben, so muß wohl das Gleiche für alle vorhandenen Systeme von Massen gelten. Dies war die frühere Auffassung, namentlich als man einsah, daß Wärme, welche Auffassung man auch von ihrem inneren Wesen haben mochte, immer nur von einem wärmeren zu einem kälteren Körper übergehen kann, so daß schließlich alle Wärme des Weltalls einmal ausgeglichen sein wird, worauf dann alle physikalischen Regungen der Materie, die nur andere Formen der Wärme sind, aufhören müssen.

In unserer Auffassung aber sind jene beiden Formen von Energie gar nicht wesentlich verschieden. Die kreisende Bewegung eines Massenpunktes in irgend einem System, sei es von molekularen oder von Weltkörperdimensionen, übt nach außen hin keine Wirkung, als daß die Massenanziehung des Mittelpunktes seines Systems durch seine Anwesenheit vermehrt wird. Ein die Sonne umkreisender Meteorstein besitzt also in dem von der Welt der Moleküle übertragenen Sinne nur latente Kraft für die Wirkung seines Systems nach außen. Innerhalb solcher Grenzen aber, in denen der betreffende Teil seiner geschlossenen Bahn als gerade Linie anzusehen ist, mit anderen Worten, für Masseneinheiten, die eine Stufe der Naturentwickelung tiefer stehen, wird diese für den Weltraum potentielle Energie des Meteorsteins durchaus zu kinetischer, er schlägt in unsere Atmosphäre und ruft eine sehr kräftige Wärmebewegung in ihr hervor. Es gibt deshalb auch keinen Unterschied in dem Verbrauch dieser beiden Energiearten, wenn man das große Ganze übersieht.

Die Uratome, welche noch mit keinem anderen ihresgleichen zusammengetroffen sind, haben nur lebendige Kraft. Je mehr sich deren zusammengruppieren, je vollkommenere Systeme sie bilden, desto mehr geht diese lebendige Kraft in sogenannte Spannkraft über, die in der Umlaufsbewegung der einzelnen Teile um ihren Massenmittelpunkt besteht. Aber auch diese muß allmählich abnehmen, denn es gibt in der Welt keine Bewegung ohne eine Hemmung, weil eben kein System für sich besteht. Wenn alle Masseneinheiten des Systems sich vereinigt haben, ist die Bewegung innerhalb des Systems gleich Null geworden. Das frühere Molekül oder Sonnensystem wird dann aber noch eine Eigenbewegung haben, und diese wird es einem anderen System zuführen, in dem die übrig gebliebene kinetische Energie (Eigenbewegung) abermals, wie bei den Uratomen, zum Teil in Spannkraft, Umlaufsbewegung, übergeht, die wieder bis auf Null abnimmt, und so fort. Die Masseneinheiten werden beständig größer, ihre Bewegungen dafür kleiner. Wir kommen hier zu denselben Schlüssen, die zu der Überzeugung einer beständig zunehmenden „Entropie" führen, an der in der Tat nicht gezweifelt werden kann.

Wir gehen sogar noch einen Schritt weiter, indem wir selbst die Spannkräfte, in welche sich die lebendigen beständig verwandeln, sich allmählich aufzehren lassen. Auch unsere Stufenleiter der Entwickelung hilft uns über die Schwierigkeit nicht hinweg. Da die jedem einzelnen Uratom mitgegebene lebendige Kraft nicht unendlich groß sein kann, weil sie ja endliche Wirkungen hervorbringt, selbst aber beständig abnimmt, so muß sie notwendig einmal nach einer endlichen Zeitspanne gleich Null werden. Es treten immer mehr Uratome durch die verschiedenen Entwickelungsstufen in den Zustand der Weltkörper.

Ein Wasserstoffatom, das wir bis auf wenige Zehner von Graden auf den absoluten Nullpunkt abgekühlt haben, hat nur noch eine ganz geringe Spannkraftbewegung und, da es flüssig ist, auch nur wenig kinetische Energie in Bezug auf das einschließende Gefäß. Dieses wieder führt nur noch die kosmischen Bewegungen der Erde mit aus. Alles in allem kann ein solches Atom in Rücksicht auf einen beliebigen festen Punkt in dem größten denkbaren Weltsystem nur noch eine Bewegung von einigen Zehnern oder Hunderten von Kilometern in der Sekunde haben, während es doch, unter unserer Voraussetzung, daß es sich einstmals aus Uratomen gebildet hat, mindestens die Geschwindigkeit des Lichtes, 300,000 km, besessen haben muß. Dafür hilft es nun am Bau unserer Erde und an der Unterhaltung des Lebens mit, wozu solche geringeren Relativbewegungen durchaus erforderlich sind.

Aber für diese gebundenen Uratome dringen aus allen Teilen des Weltraums beständig neue, mit jener ungeheueren kinetischen Energie versehene Uratome ein. Soweit wir das Getriebe des Naturgeschehens zurückverfolgen können, soweit unsere Fernrohre in den Raum hinausschauen, bleibt ihre Kraft und ihre Zahl, von der die Bewegungen der Himmelskörper, ihr Licht und alle übrigen Eigenschaften des Stoffes überhaupt unmittelbar abhängen, unverändert. Die Fülle dieser Uratome müssen wir, wenn wir die Zeit ohne Anfang nehmen, für wahrhaft unendlich groß erklären, weil eben der Zustand der allgemeinen Entropie noch nicht eingetreten ist; und deshalb kann er auch niemals eintreten.

In letzter Linie wurzelt auch das Gesetz von der Erhaltung der Kraft in dieser durchschnittlich ewig gleichbleibenden Fülle und Kraft der Uratome. Die nicht bewegte Materie selbst hat ja keine Kraft und Eigenschaft. Würde also Zahl oder Geschwindigkeit dieser Uratome schwanken, so müßte auch gleichzeitig jede Eigenschaft der Materie, besonders auch die für uns in Erscheinung tretende Gesamtkraft schwanken. Es ist falsch, zu sagen,

wie man oft hört, daß aus dem Gesetz von der Erhaltung der Kraft gefolgert werden müsse, die Gesamtkraft des Universums sei konstant; es sei denn, man nähme einen unendlich großen Wert auch für eine Konstante. Es ist auch falsch, von der zwar an sich richtigen Annahme auszugehen, daß ein endlicher, von dem übrigen unendlichen Raum abgeschlossener Teil des Ganzen unter allen Umständen der Regungslosigkeit verfallen muß, und hieraus einen Schluß auf das Ganze zu ziehen. Die Annahme der Abgeschlossenheit irgend eines Materiekomplexes widerspricht eben allen Erfahrungen; es ist stets in der Natur alles mit allem in ununterbrochener Verbindung, und wir beziehen alle verloren gehende Kraft immer sofort wieder aus der Unendlichkeit, der Unerschöpflichkeit selbst. Wie wir überall in der Natur in den engeren von uns leichter zu überblickenden Gebieten eine ausgleichende Tätigkeit wahrnehmen, so auch im unendlichen Universum.

Von dem ersten zentralen Zusammenstoß zweier Uratome an, durch welchen alle ihre Kraft vernichtet, aber ein größerer Körper geschaffen wird, der von der einen Aufgabe, Kraft auszuüben, zu der andern übergeht, Kraft zu empfangen und als Baustein verwendet zu werden, sehen wir alle Körper im Raume sich ständig vergrößern, ihren Aufbau vervollkommnen, indem sie sich im Hagel der Uratome immer günstiger gruppieren. Es ist nur ein Wachstum möglich, wenn auch in wellenförmigen Bahnen. Nur das Größere kann das Kleinere zertrümmern und muß sich mit ihm wieder vergrößern. Höher und höher steigt auf immer breiterer Basis die Entwickelung empor. Atome werden zu Weltkörpern, und Weltkörper werden wieder zu Atomen einer höheren Stufe. Es gibt kein Ende als in der Kurzsichtigkeit unserer Sinne.

Register.



Druck vom Bibliographischen Institut in Leipzig.

	M.	Pf.
Die Naturkräfte. Ein Weltbild der physikalischen und chemischen Erscheinungen. Von Dr. ***M. Wilhelm Meyer.*** Mit 474 Abbildungen im Text und 29 Tafeln in Holzschnitt, Ätzung und Farbendruck. Geheftet, in 15 Lieferungen zu je 1 Mk. — Gebunden, in Halbleder	17	—
Bilder-Atlas zur Zoologie der Säugetiere, von Professor Dr. ***W. Marshall.*** Beschreib. Text mit 258 Abbildungen. Gebunden, in Leinwand	2	50
Bilder-Atlas zur Zoologie der Vögel, von Professor Dr. ***W. Marshall.*** Beschreibender Text mit 238 Abbildungen. Gebunden, in Leinwand	2	50
Bilder-Atlas zur Zoologie der Fische, Lurche und Kriechtiere, von Prof. Dr. ***W. Marshall.*** Beschreibender Text mit 208 Abbildungen. Gebunden, in Leinwand	2	50
Bilder-Atlas zur Zoologie der Niederen Tiere, von Prof. Dr. ***W. Marshall.*** Beschreib. Text mit 292 Abbildungen. Gebunden, in Leinw.	2	50
Bilder-Atlas zur Pflanzengeographie, von Dr. ***Moritz Kronfeld.*** Beschreibender Text mit 216 Abbildungen. Gebunden, in Leinwand	2	50
Kunstformen der Natur, von Prof. Dr. ***Ernst Haeckel.*** 100 Illustrationstafeln mit beschreibendem Text. In 2 Sammelkasten (im Erscheinen). . je	18	—

Geographische Werke.

	M.	Pf.
Die Erde und das Leben. Eine vergleichende Erdkunde. Von Prof. Dr. ***Friedrich Ratzel.*** Mit 487 Abbildungen im Text, 21 Kartenbeilagen und 46 Tafeln in Holzschnitt, Ätzung und Farbendruck. Geheftet, in 30 Lieferungen zu je 1 Mk. — Gebunden, in 2 Halblederbänden . . . . . je	17	—
Afrika. Zweite, von Prof. Dr. ***Friedr. Hahn*** umgearbeitete Auflage. Mit 173 Abbildungen im Text, 11 Karten und 21 Tafeln in Holzschnitt, Ätzung und Farbendruck. Geheftet, in 15 Lieferungen zu je 1 Mk. — Gebunden, in Halbleder	17	—
Australien, Ozeanien und Polarländer, von Prof. Dr. ***Wilh. Sievers*** und Prof. Dr. ***W. Kükenthal.*** Zweite, neubearbeitete Auflage. Mit 198 Abbildungen im Text, 14 Karten und 24 Tafeln in Holzschnitt, Ätzung und Farbendruck. Geheftet, in 15 Lieferungen zu je 1 Mk. — Gebunden, in Halbleder	17	—
Asien, von Prof. Dr. ***Wilh. Sievers.*** Mit 156 Abbildungen im Text, 14 Karten und 22 Tafeln in Holzschnitt und Farbendruck. Geheftet, in 13 Lieferungen zu je 1 Mk. — Gebunden, in Halbleder	15	—
Süd- und Mittelamerika, von Prof. Dr. ***Wilh. Sievers.*** Mit 145 Abbildungen im Text, 10 Karten und 20 Tafeln in Holzschnitt, Ätzung und Farbendruck. Geheftet, in 14 Lieferungen zu je 1 Mk. — Gebunden, in Halbleder	16	—
Nordamerika, von Dr. ***Emil Deckert.*** Mit 160 Abbildungen im Text, 12 Karten und 15 Tafeln in Holzschnitt, Ätzung und Farbendruck. (Im Erscheinen.) Geheftet, in 14 Lieferungen zu je 1 Mk. — Gebunden, in Halbleder	16	—
Europa, von Dr. ***A. Philippson*** und Prof. Dr. ***L. Neumann.*** Herausgegeben von Prof. Dr. ***Wilh. Sievers.*** Mit 166 Abbildungen im Text, 14 Karten und 28 Tafeln in Holzschnitt und Farbendruck. Geheftet, in 14 Lieferungen zu je 1 Mk. — Gebunden, in Halbleder	16	—
Meyers Hand-Atlas. *Zweite, neubearbeitete Auflage.* Mit 113 Kartenblättern, 9 Textbeilagen und Register aller auf den Karten befindlichen Namen. Geheftet, in 38 Lieferungen zu je 30 Pf. — Gebunden, in Halbleder	13	50
Neumanns Orts-Lexikon des Deutschen Reichs. *Dritte, neubearbeitete Auflage.* Mit 34 Karten und Plänen und 276 Wappenbildern. Gebunden, in Halbleder	15	—

Druck vom Bibliographischen Institut in Leipzig



